

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

В.М.Сліденко, В.О.Поліщук

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ**

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 141 “Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка”,
спеціалізацією «Електромеханічні та мехатронні системи
енергоємних виробництв»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2020

Рецензент: Федосенко Миколай Миколайович, канд. техн. наук, доцент

Відповідальний редактор: Шевчук Степан Прокопович, доктор. техн. наук, професор

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 10 від 18.06.2020 р.)
за поданням Вченої ради інституту енергозбереження та енергоменеджменту
(протокол № 12 від 28.04.2020 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

*Сліденко Віктор Михайлович, доктор техн. наук., доцент,
Поліщук Валентина Омелянівна, ст. викладач*

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Математичне моделювання та ідентифікація електромеханічних систем. Лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”, освітня програма “Електромеханічні та мехатронні системи енергоємних виробництв”/ КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,12 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 61 с.

Лабораторний практикум призначено для студентів спеціальності 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”. Він допоможе набути компетентностей щодо практичного визначення основних параметрів лабораторних зразків ударно-хвильових пристроїв з мехатронним керуванням програмуванням в системі MathCAD та мовою C#. У практикумі наведено необхідні теоретичні відомості для підготовки до кожної лабораторної роботи та покрокова інструкція до їх виконання. Перелік запитань до самопідготовки після кожної роботи допоможе підготуватися до її здачі. Представлені шаблони протоколів лабораторних робіт та текстів програм дозволять студентам швидко та якісно оформити роботи. У вступі наведені загальні правила написання висновків. Видання може використовуватися студентами будь-яких електромеханічних спеціальностей.

© В. М. Сліденко, В. О. Поліщук, 2020
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
Правила техніки безпеки	6
Оформлення протоколу та порядок захисту роботи.....	8
Лабораторна робота № 1 – ідентифікація та експериментальне визначення параметрів і характеристик гідроімпульсної системи маніпулятора.....	9
Лабораторна робота №2 – графічне програмування елементів системи “бойок-інструмент -масив”	16
Лабораторна робота №3. – визначення основних параметрів ударно-хвильової системи.....	20
Лабораторна робота №4. Дослідження перехідного процесу.....	33
Лабораторна робота №5. Дослідження коливань одномасової моделі за умов резонансу.....	41

ВСТУП

Даний лабораторний практикум складається з циклу лабораторних робіт, присвячених методам моделювання та ідентифікації гідродинамічних систем з визначенням їх основних характеристик експериментально та за допомогою математичного моделювання з програмуванням та комп'ютерною реалізацією. Ці роботи входять до дисципліни “Математичне моделювання та ідентифікація електромеханічних систем” і можуть бути використані студентами всіх електромеханічних спеціальностей як денної, так і заочної форм навчання.

Метою лабораторних робіт в даній навчальній дисципліні є формування у студентів ряду компетентностей:

- *здатність ідентифікувати структуру, та параметри натурних зразків гідроімпульсних систем та відображати їх структуру графічно;*
- *здатність формувати розрахункові схеми та моделі динамічних процесів у сфері електромеханіки та мехатроніки;*
- *здатність розробляти та застосовувати алгоритми для вирішення задач ідентифікації динамічних процесів;*
- *здатність використовувати сучасні методи програмування для вирішення на ЕОМ задач динаміки.*

При цьому після засвоєння навчальної дисципліни студенти мають продемонструвати такі результати навчання:

знання:

- за основними методами з математичного моделювання та ідентифікації;
- з моделювання процесів на прикладі механічних коливань;
- з моделювання нелінійних задач за допомогою фазових портретів динамічних систем;
- з основ програмування в MathCAD та мовою C#;

вміння:

- володіти відповідною термінологією і користуватися довідковою літературою;
- зводити до еквівалентних динамічних параметри машин та механізмів;
- побудувати розрахункову схему та математичний аналог динамічного процесу на основі одномасової моделі;
- проектувати додатки на основі сучасних технологій з підключенням мультимедійних засобів;
- використовувати методи обчислювальної математики для практичних задач електромеханіки.

мати досвід:

- роботи на персональному комп'ютері, включаючи зовнішні пристрої;
- розробки алгоритмів та програмування мовою C#;
- роботи в пакетах AutoCAD, MathCAD,
- проектування додатків.

Ступінь готовності студента до виконання роботи оцінюється за результатами експрес-тесту до якого включені питання стосовно інформації,

необхідної для свідомого виконання відповідних досліджень. Студент без протоколу лабораторної роботи до захисту роботи не допускається.

Покрокова інструкція щодо обробки експериментальних та розрахункових даних сприятиме отриманню достовірних результатів.

Студенти до початку роботи повинні ознайомитися з теоретичними відомостями за допомогою інформації з даного практикуму та конспекту лекцій.

В процесі виконання роботи студенти самостійно виконують необхідні розрахунки, заповнюють всі таблиці, будують графічні залежності (з застосуванням відповідного програмного забезпечення) та формулюють висновки. Якщо студент не зміг виконати вчасно аудиторну частину роботи, він не допускається до захисту лабораторної роботи без її відпрацювання. Захист лабораторної роботи проводиться у визначений викладачем час.

Для правильного формулювання висновків доцільно скористатися наступними рекомендаціями: висновки пишуться по пунктах; скорочення слів у висновках не допускається; кожен пункт повинен містити не лише інформацію щодо встановленого факту, а і його аналіз за схемою (рис.1).



Рисунок 1 – Порядок верифікації результатів

Перший висновок після кожної роботи повинен вказувати на те, чи опанована відповідна методика досліджень та в чому це полягає. Це може бути сформульовано, наприклад, наступним чином:

1. Протягом виконання лабораторної роботи була опанована методика (назва), що дозволило отримати достовірні результати стосовно рівня (яких саме) характеристик (вказати які можливі рівні значень параметрів):

“В процесі виконання лабораторної роботи була опанована методика дослідження динамічних процесів з застосуванням методу Даламбера з програмуванням в MathCAD та мовою С# (зазначити яких параметрів), що дозволило з незначними похибками (при можливості вказати похибку) встановити їх раціональний рівень”.

2. Отримані результати досліджень верифікуються за наступними даними: (в порівнянні з результатами інших авторів, відображених в публікаціях) наводяться конкретні числові дані.

3. Рекомендації по вдосконаленню досліджень та вдосконаленню конструкції електромеханічного пристрою.

Протягом перебування в лабораторії та виконання лабораторних робіт необхідно дотримуватися правил техніки безпеки, викладених нижче.

ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

1. Загальні правила безпеки.

1.1. На період карантину протягом занять студенти повинні дотримуватися правил поведінки рекомендованих МОЗ України.

1.2. Студенти повинні дотримуватись розкладу навчальних занять та графіку виконання робіт.

1.3. Під час занять студенти мають виконувати правила пожежної безпеки, особистої гігієни, тримати в чистоті робоче місце, знати місця розташування первинних засобів пожежогасіння.

1.3. В разі виникнення надзвичайної ситуації чи нещасного випадку необхідно негайно сповістити про це викладача або лаборанта і діяти у відповідності до ситуації, що склалася (надати першу допомогу постраждалому, покинути приміщення тощо).

1.4. Студенти, що допустили порушення правил техніки безпеки чи інструкції по виконанню роботи відстороняються від виконання лабораторної роботи, притягаються до відповідальності і з усіма студентами проводиться повторний інструктаж з техніки безпеки.

1.5. Забороняється: приходити до лабораторії у верхньому одязі; вживати їжу чи напої в приміщенні лабораторії; розмовляти по мобільному телефону; класти сумки та інші особисті речі на столи та лабораторне устаткування.

2. Правила безпеки перед початком роботи.

2.1. До виконання лабораторних робіт допускаються лише ті студенти, що пройшли інструктаж з техніки безпеки та мають відповідний запис у журналі обліку, який підтверджується особистими підписами студентів.

2.2. Перед початком роботи необхідно ознайомитися зі змістом, порядком проведення та особливостями безпечного виконання лабораторної роботи, отримати у викладача зразки для випробувань, завдання для проведення обчислень на ЕОМ.

2.3. Підготувати до роботи робоче місце, забрати сторонні предмети. Прилади та обладнання, а також ПК розташувати таким чином, щоб унеможливити їх падіння чи перекидання.

2.4. Забороняється: вмикати лабораторне устаткування та ПК без дозволу викладача; тримати на робочому місці предмети, що не потрібні протягом виконання завдання.

3. Вимоги безпеки в процесі виконання роботи

3.1. Потрібно дбайливо ставитися до приладів та устаткування, що забезпечить їх надійну роботу і унеможливить нещасні випадки.

3.2. Потрібно точно виконувати всі настанови викладача, без його дозволу не виконувати самостійно будь-які дії.

3.3. Слідкувати за справністю всіх кріплень в приладах, не нахилятися низько над тими частинами машин та механізмів, що рухаються.

3.4. Наявність напруги в електричному ланцюгу перевіряти тільки за участі викладача та лише за допомогою приладів.

3.5. Не допускати максимального навантаження вимірювальних пристроїв.

3.6. Користуватися інструментами з ізольованими ручками.

3.7. Протягом роботи з рідинами не контактувати з ними, не розбризкувати та не розливати.

3.8. При підімкненні ноутбуків до електромережі допускається тільки безпечне розташування проводень за контролю викладача.

3.9. Забороняється: виконувати роботу за відсутності викладача; залишати без нагляду працююче обладнання; доторкатися до елементів електричного обладнання, що знаходяться під напругою.

4. Правила безпеки по закінченню роботи

4.1. Після закінчення виконання лабораторної роботи необхідно вимкнути обладнання під наглядом викладача.

4.2. Навести порядок на робочому місці, здати викладачу зразки та інші матеріали, що використовувалися.

4.3. Отримати у викладача відмітку про виконання експериментальної частини роботи.

4.4. Забороняється: залишати без нагляду працююче обладнання; виходити з лабораторії без дозволу викладача.

5. Правила безпеки в аварійних ситуаціях

- 5.1. В разі виявлення несправності в роботі електричних приладів, що знаходяться під напругою (підвищеному їх нагріванні, появі іскріння, запаху горілої ізоляції тощо) необхідно одразу вимкнути джерело живлення та повідомити викладача.
- 5.2. У випадку розбиття лабораторного посуду чи скляних приладів не збирати уламки незахищеними руками, а використати віник і совок.
- 5.3. У випадку розливання легкозаймистої рідини або її займанні негайно повідомити про це викладача та діяти у відповідності до його наказів.
- 5.4. У випадку розливання хімічних речовин виконати кроки для їх нейтралізації та промити великою кількістю води.
- 5.5. В разі виникнення пожежі негайно повідомити про це викладача і покинути приміщення у встановленому порядку.
- 5.6. В разі травмування себе або оточуючих повідомити викладача та надати постраждалим першу допомогу. За необхідності викликати швидку допомогу.

ОФОРМЛЕННЯ ПРОТОКОЛУ ТА ЗАГАЛЬНИЙ ПОРЯДОК ЗАХИСТУ РОБОТИ

Для допуску до лабораторної роботи кожен студент повинен мати у роздрукованому вигляді протокол лабораторної роботи. Чітко виконуючі наведені у протоколі інструкції, студент проводить дослідження та заносить отримані первинні результати до відповідних таблиць.

Їх обробка здійснюється за допомогою програмного забезпечення. Результати також вносяться до таблиць в протоколі. Аналіз отриманих даних наводиться у висновках. Необхідні графічні залежності роздруковуються в протокол.

Захист лабораторної роботи здійснюється у визначений викладачем час.

Оцінювання виконується у відповідності до рейтингового критерію оцінювання знань, наведеного у робочій програмі кредитного модулю.

Лабораторна робота №1

Ідентифікація та експериментальне визначення параметрів і характеристик гідроімпульсної системи маніпулятора.

1. Мета: Дослідження структури та функцій гідроімпульсних систем (ГІС)

2. Задачі:

2.1 Провести аналіз структури ГІС, описати будову гідромолота з визначенням характерних фаз і описом його принципу дії за інтегральною характеристикою (циклограмою руху бойка).

2.2. Описати основні елементи стенду для експериментальних досліджень гідромолота.

2.3. Виконати в лабораторії ескізи елемента ударної системи: бойка та інструмента з застосуванням стандартів ЄСКД та оформити креслення в AutoCad з застосуванням стандартів ЄСКД.

3. Теоретичні відомості.

Ударний елемент ГІС – гідромолот є змінним робочим органом гідравлічних екскаваторів і може застосовуватись в якості обладнання підземних комбайнів, прохідницьких щитів [1]. Проблема вибору його параметрів, враховуючи швидкозмінність при переходах від однієї фази до іншої, нелінійність процесів його функціонування, пов'язані з ефективністю моделювання та інтегрування жорсткої системи диференціальних рівнянь. Моделювання процесу функціонування з урахуванням енергорозподілу в межах фаз за циклограмою руху ударного елемента - бойка дозволяє встановити раціональні параметри функціонування гідромолота.

На сьогодні, в практиці моделювання машин ударної дії все більше уваги приділяється взаємодії основних елементів бойка та інструмента з гірською породою [2].

Як підкреслюється дослідниками з цієї проблеми, визначення раціонального розподілу енергії гідроприводу базової машини та значень параметрів гідромолота дозволяє встановити раціональний режим його функціонування

Синтезована ГІС з гідромолотами типу ГПМ-300 (модифікацій А, Б, В) для екскаваторів ЕО-4321Б та ЕО-4322, яка прийнята у виробництво (ВО "АТЕК", м. Київ), але відрізняється від відомих запровадженням камери гідроудару, яка дозволяє реалізувати ідею рекуперації енергії в процесі зведення з використанням її в процесі реверсу та розгону бойка. ГІС (рис. 1) включає гідравлічні елементи: Н – насос, Б – бак, Ф – фільтр, КЗ_1, КЗ_2 – клапани запобіжні, Р – розподілювач, ГМ – гідромолот ГПМ-300 (А, Б, В). Гідромолот складається із корпусу 1, в якому установлені співосно бойок 2, інструмент 3, підпружинений клапан 4 з радіальними отворами 5, втулка камери зливу 6 і поршень акумулятора 7. Зарядка акумулятора азотом здійснюється через зарядний пристрій 8. Кріплення інструмента 3 в корпусі здійснюється за допомогою

фіксатора 9. Гідромолот має кріплення з маніпулятором через кронштейн 10. В корпусі гідромолота послідовно розташовані камери зведення 11, зливу 12 (між клапаном 4 і втулкою 6), реверсу 13, акумулятора 14 [3].

На рис. 2 наведена циклограма руху бойка, яка служить основою формування математичних моделей. Характеристики фаз: 0-1 – підтискування маніпулятором гірничої машини інструмента до породного масиву за час $t_{п}$; 1-2 – стиснення робочої рідини в камері зведення до величини, необхідної для початку руху спряжених бойка і клапана, які діють на поршень акумулятора 5 за час $t_{ст}$; 2-3 – переміщення спряжених бойка, клапана і поршня на величину $l_{зв}$, яке супроводжується зарядкою акумулятора за час $t_{зв}$; 3-4 – реверс бойка з розстикуванням спряжених бойка і клапана під дією гідроудару в порожнині 10, прискорений розгін з переміщенням бойка на величину $l_{г+па}$ від комбінованої дії гідроприводу та пневмоакумулятора за час $t_{г+па}$; 4-5 – розгін бойка з повним переміщенням тільки від дії пневмоакумулятора за час $t_{па}$; 5-6 – удар бойка по інструменту і передача енергії в гірський масив за час $t_{у}$.

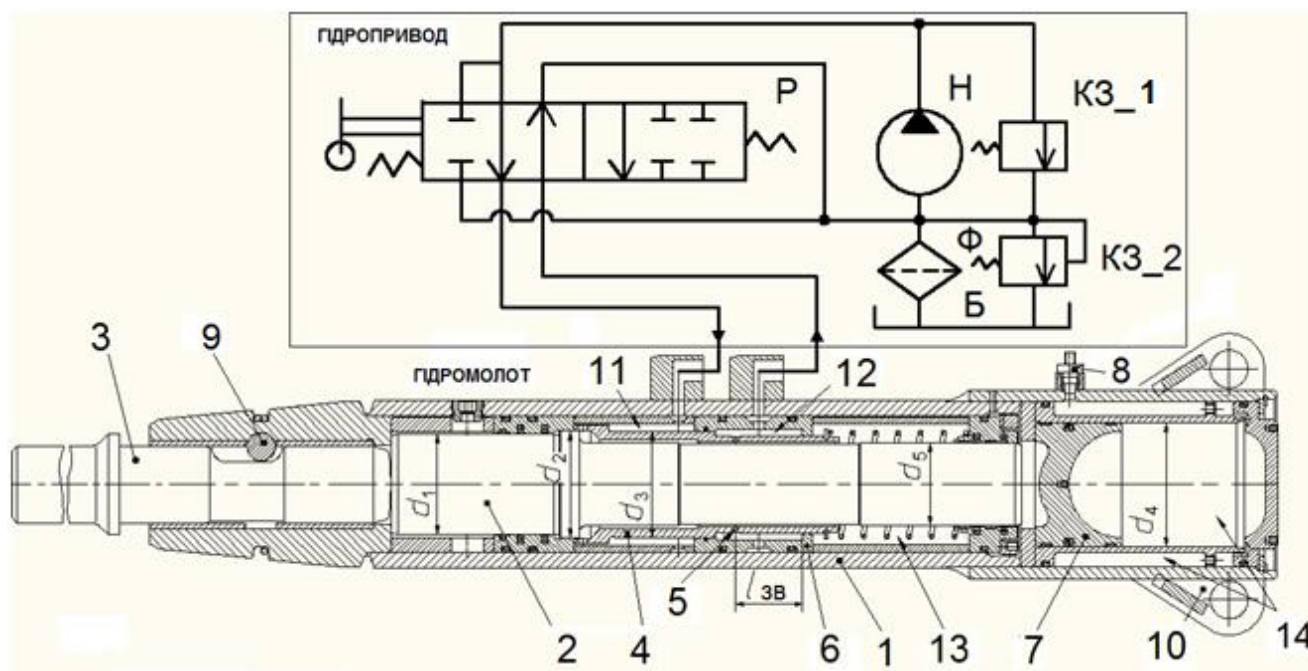


Рисунок 1 – ГІС (за типом гідромолота ГПМ-300, модифікацій А, Б, В)

Фаза 2-3 пов'язана з рухом бойка, клапана і поршня, який супроводжується зарядкою акумулятора за час $t_{зв}$. В процесі руху рідина з камери 13 витісняється через радіальний отвір 5 в клапані 4 в зливну магістраль через камеру зливу 12. В кінці цієї фази отвір 5 різко перекривається кромкою втулки 6, і в камері 13 виникає гідроудар, що призводить до роз'єднання спряжених бойка 2 і клапана 4.

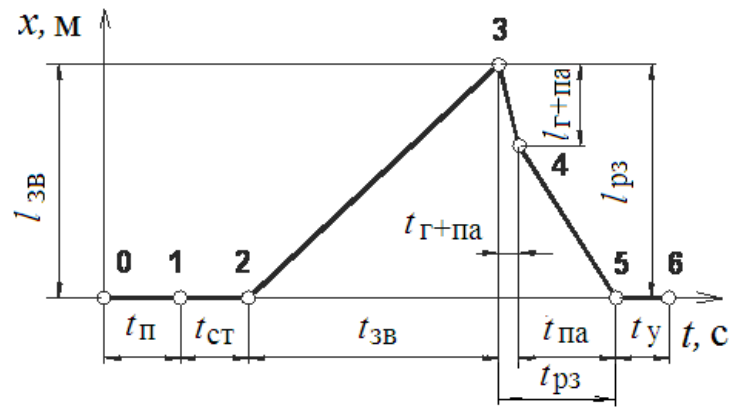


Рисунок 2 – Циклограма руху бойка

На рис.3 наведена спрощена конструктивна схема основного элемента ГИС – гідромолота з його особливими конструктивними елементами: 1 - робочий інструмент; 2 – фіксатор; 3 – передня частина корпусу; 4 – бойок; 5 – корпус гідромолота; 6 – клапан; 7 – втулка; 8 – пружина; 9 – стакан пневмоаккумулятора; 10 – поршень пневмоаккумулятора.

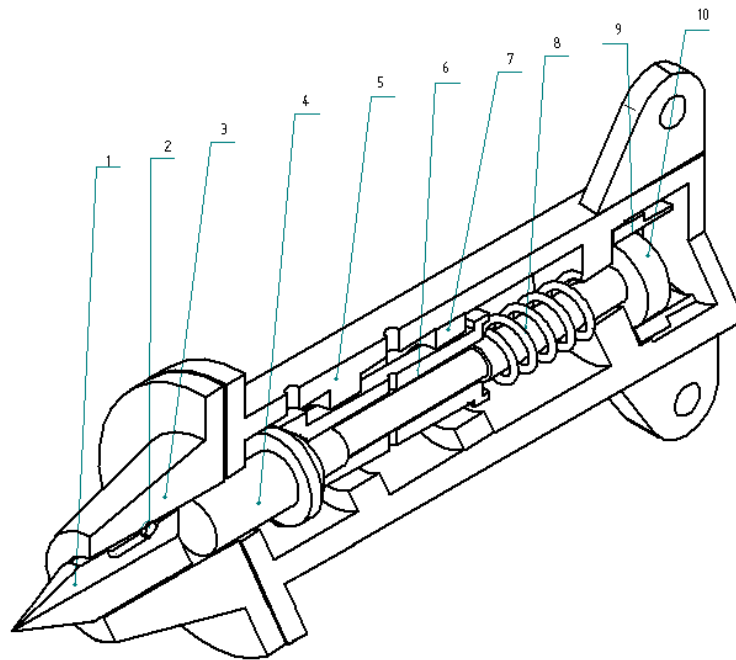


Рисунок 3 – Спрощена конструктивна схема гідромолота

Конструкція гідромолота має деякі конструктивні особливості:

1. *Наявність пневмоаккумулятора* – який розташовано в задній частині гідромолота. Пневмоаккумулятор (рис.4) являє собою окрему камеру, яка попередньо наповнюється азотом, а під час зведення бойка гідромолота він інтенсивно стискується переміщенням поршня.

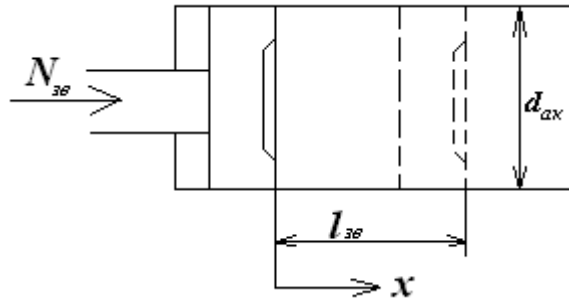


Рисунок 4 – Схема процесу зарядки пневмоаккумулятора

Цей процес відповідає режиму зарядки (фаза 2-3 рис.2) пневмоаккумулятора через те, що робота яка затрачується гідроприводом на зведення бойка перетворюється в потенціальну енергію зарядки.

Зарядка аккумулятора (рис.4) пов'язана з політропічним стисненням газу в аккумуляторі за рахунок зменшення об'єму аккумулятора:

$$P_{ak0} \cdot V_{ak}^n = P_{akt} \cdot V_{ak}^n = const ,$$

звідки

$$P_{akt} = P_{ak0} \cdot \left(\frac{V_{ak0}}{V_{akt}} \right)^n ,$$

де n - показник політропи ($n=1.2...1.5$ - для зарядки, $n=1.3...1.6$ - для розрядки аккумулятора).

2. Площа зведення $F_{зв}$ (рис.5)– площа на яку діє тиск гідропривода, і завдяки якій проходить зведення бойка.

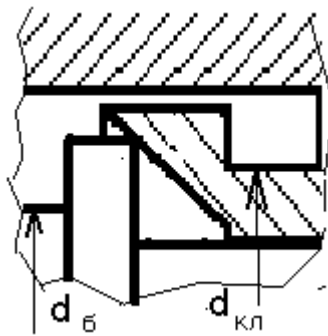


Рисунок 5 – Схема процесу зведення спряжених бойка і клапана

Умови зведення:

$$d_b < d_{кл} ,$$

$$F_{зв} = \frac{\pi \cdot (d_{кл}^2 - d_b^2)}{4}$$

Подача рідини в камеру зведення досягається установкою золотника гідророзподільвача в робоче положення і цим досягається стиснення рідини в

камері зведення до величини, яка перевищує опір акумулятора. Стиснення рідини викликає підвищення тиску в камері зведення [4]:

$$\Delta p = \frac{E_p \cdot \Delta V}{V_0}$$

де E_p - модуль пружності рідини ($E_p = 1250 \dots 1750$ МПа – для мінерального масла); ΔV - зміна об'єму камери зведення, яка зв'язана притоком рідини; V_0 - початковий об'єм рідини в камері зведення. Відповідно сила зведення

$$N_{зв} = \Delta p \cdot F_{зв}.$$

Сила опору пневмоакумулятора зведенню визначається

$$N_{ак} = \Delta p_{ак0} \cdot F_{ак}$$

Умова зведення: $N_{зв} \geq N_{ак}.$

В КПІ ім. Ігоря Сікорського розроблена конструкція гідромолотка, в якому властивість рекуперації досягається використання кінетичної енергії бойка в кінці його зведення для перемикання керуючого клапана в робоче положення для забезпечення робочого ходу бойка [9; 10].

Дослідження робочого циклу та динамічних характеристик ручного гідромолотка проводились на стенді (рис. 6) [5]. Стенд включає: 1 – гідромолоток, 2 – рухому платформу, 3 – датчик коливань тиску в нагнітальній магістралі, 4 – датчик коливань тиску в зливній магістралі, 5 – датчик коливань тиску в робочій камері, 6 – манометр для вимірювання тиску в рухомій платформі 2, 7 – аналого-цифровий перетворювач, 8 – ЕОМ.

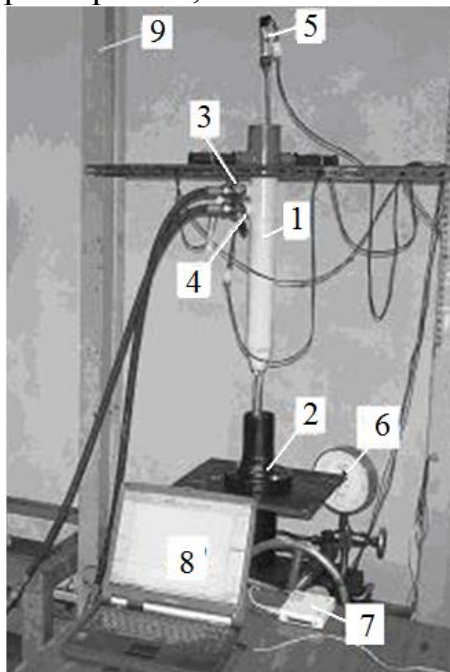


Рисунок 6 – Стенд для експериментальних досліджень параметрів гідромолотка

Осцилограми зміни тиску записувались в контрольних точках циклу роботи гідромолотка при зміні подачі рідини від 25 до 35 л/хв. та зміні сили підтискування від 150 до 250 Н.

Проведені експериментальні дослідження дозволили встановити робочий діапазон за умови енергоощадності процесу функціонування гідромолотка при забезпеченні енергії удару $0,1 \dots 0,2$ кДж та частоті ударів $5 \dots 30$ Гц в залежності від режиму роботи гідроприводу. Такі значення основних параметрів забезпечують ефективний процес руйнування гірських порід в широкому діапазоні параметрів їх міцності при зменшенні вібрації гідромолотка. Конструкція гідромолотка захищена патентами України [2; 5].

4. Порядок виконання лабораторної роботи

- 4.1. За наданими кресленнями ідентифікувати лабораторний зразок гідромолотка.
- 4.2. Провести опис стенда для випробування ударно-хвильових систем.
- 4.3. В присутності викладача та лаборанта запустити стенд та описати його параметри тиску та подачі.
- 4.4. Провести ескізування елемента конструкції гідромолота.

5. Оформлення звіту та порядок його подання

Якщо лабораторна робота виконана на комп'ютері і перевірена викладачем, наступний етап - підготовка звіту та його захист. Звіт оформляється згідно вимог щодо оформлення звітів.

Захист лабораторної роботи проводиться на наступному занятті.

Звіт складається з таких розділів:

1. Назва лабораторної роботи.
2. Мета лабораторної роботи.
3. Задачі лабораторної роботи.
4. Теоретичні відомості до виконання лабораторної роботи.
5. Інформаційне та технічне забезпечення
6. Завдання на виконання лабораторної роботи
7. Результат роботи.

Висновки

6. Контрольні запитання для захисту лабораторної роботи :

1. Основні елементи конструкції гідромолота.
2. Умови герметизації гідравлічних вузлів.
3. Основні залежності, які визначають енергію удару.
4. Циклограма руху бойка, як інтегральна характеристика функціонування ударної системи.
5. Основні елементи конструкції та вузли стенда для дослідження динамічних систем.

Література

1. Сліденко В.М., Шевчук С.П. Стабілізація функціонування гірничої машини з імпульсним виконавчим органом: монографія. Київ: НТУУ "КПІ", 2010. 192с.
2. Сліденко В.М., Шевчук С.П., Замараєва О.В., Лістовщик Л.К. Адаптивне функціонування імпульсних виконавчих органів гірничих машин: монографія. Київ: НТУУ "КПІ", 2013. 180 с .
3. Сліденко В.М., Сліденко О.М. Математичне моделювання ударно-хвильових процесів гідроімпульсних систем гірничих машин: монографія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во "Політехніка", 2018. 220 с.
4. Коваль П.В. Гидравлика и гидропривод горных машин: Учебник для вузов по специальности «Горные машины и комплексы.» - М.: Машиностроение, 1979 – 258 с,
5. Єрошенко В.А., Сліденко В.М., Шевчук С.П., Студенець В.П. Потужна дисипація енергії коливань гірничих машин гетерогенними ліюфобними системами: монографія. Київ: НТУУ "КПІ", 2016. 180 с.

Лабораторна робота №2

Графічне програмування елементів системи “бойок-інструмент-масив”

1. Мета: створення графічного зображення на екрані персонального комп'ютера континуальної і дискретної моделі засобами AutoCAD з елементами анімації.

2. Задачі:

2.2. Створити декілька слайдів бойка та інструмента.

2.1. За даними варіанту побудувати континуальну модель в AutoCAD.

2.3. Організувати анімацію руху бойка та інструмента до масиву.

3. Інформаційне та технічне забезпечення:

3.1. Конспект лекцій з курсу “Математичне моделювання та ідентифікація електромеханічних систем” .

3.2. Конспект лекцій з курсу “Комп'ютерна графіка”, [1 – 4].

3.3. Методичні вказівки з курсу “Математичне моделювання та ідентифікація електромеханічних систем” [5 – 7].

3.4. Персональний комп'ютер з системою автоматизованого проектування AutoCAD.

4. Заходи безпеки при виконанні лабораторної роботи

Лабораторна робота виконується в комп'ютерному класі. Інструктаж щодо виконання лабораторних робіт проводиться на першому занятті і фіксується в журналі техніки безпеки.

5. Порядок виконання лабораторної роботи

Завдання до виконання лабораторної роботи наведено в Додатку.

Варіант бойка та інструмента студент отримує на першому занятті.

6. Оформлення звіту та порядок його подання

Якщо лабораторна робота виконана на комп'ютері і перевірена викладачем, наступний етап - підготовка звіту та його захист. Звіт оформляється згідно вимог щодо оформлення звітів.

Захист лабораторної роботи проводиться на наступному занятті.

Звіт складається з таких розділів:

1. Назва лабораторної роботи.

2. Мета лабораторної роботи.

3. Задачі лабораторної роботи.

4. Теоретичні відомості до виконання лабораторної роботи.

5. Інформаційне та технічне забезпечення

6. Завдання на виконання лабораторної роботи
 7. Результат роботи (зображення системи за варіантом в AutoCAD).
- Висновки

7. Контрольні запитання для захисту лабораторної роботи :

1. Команди AutoCAD, які використовуються для побудови та редагування об'єктів [1 -3; 5-7].
2. Команди AutoCAD, які використовуються для організації анімації.

8. Список рекомендованої літератури

1. Ванін В.В., Надкринична Н.А., Перевертун В.О. Система AutoCad. К. Каравелла. 2007 – 386с.
2. Жарков Н.В. AutoCAD 2016 – СПб.;НиТ 2016.-624с.
3. Н. Полещук, В. Савельєва. AutoCAD 2004. – СПб.; БХВ-Петербург,2004.- 640с.
4. Технічне та спеціальне системне забезпечення комп'ютерної інженерної графіки. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи з курсу "Комп'ютерна інженерна графіка" для студентів усіх спеціальностей /Укл. В.М. Сліденко, Ю.О. Дорошенко.- К.:КПІ, 1993. – 80с.
5. Сліденко В.М., Поліщук В.О. Технічне і спеціальне системне забезпечення комп'ютерного моделювання. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт за курсами “Обчислювальна техніка та програмування”, "Моделювання електромеханічних систем на ЕОМ" для студентів усіх спеціальностей -К.:НТУУ "КПІ", 1997 -96 с.
6. Сліденко В.М., Поліщук В.О. Вступ до AutoCAD. Геометричне креслення в AutoCAD. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт за курсом "Моделювання електромеханічних систем на ЕОМ" -К.:НТУУ "КПІ", 1999 -72 с.
7. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Математичне моделювання електромеханічних систем” для студентів напряму підготовки 6.050702 ”Електромеханіка” [Електронний ресурс]/ НТУУ ”КПІ”; уклад. В.М. Сліденко, В.О. Поліщук. –Електронні текстові дані (1 файл: 940 Кбайт). – К.: НТУУ “КПІ”, 2013. -43 с. – Назва з екрана. – Доступ : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/7577>

Додаток – Варіанти завдань

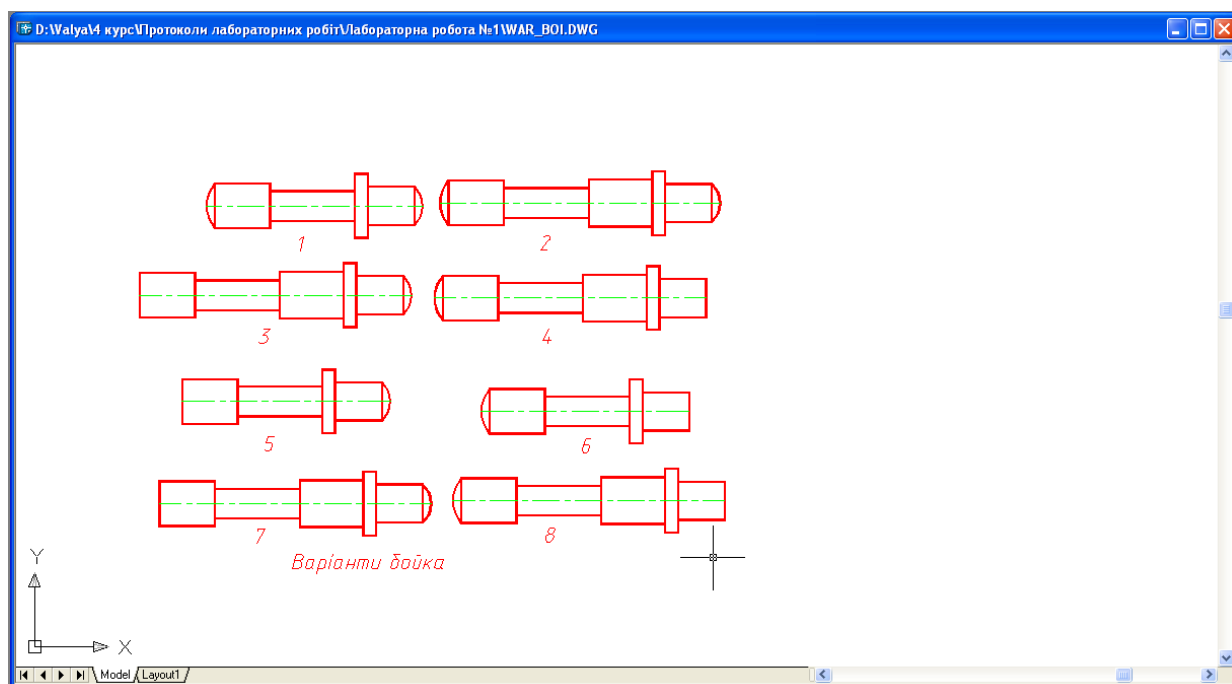


Рисунок Д.1 – Варіанти бойків

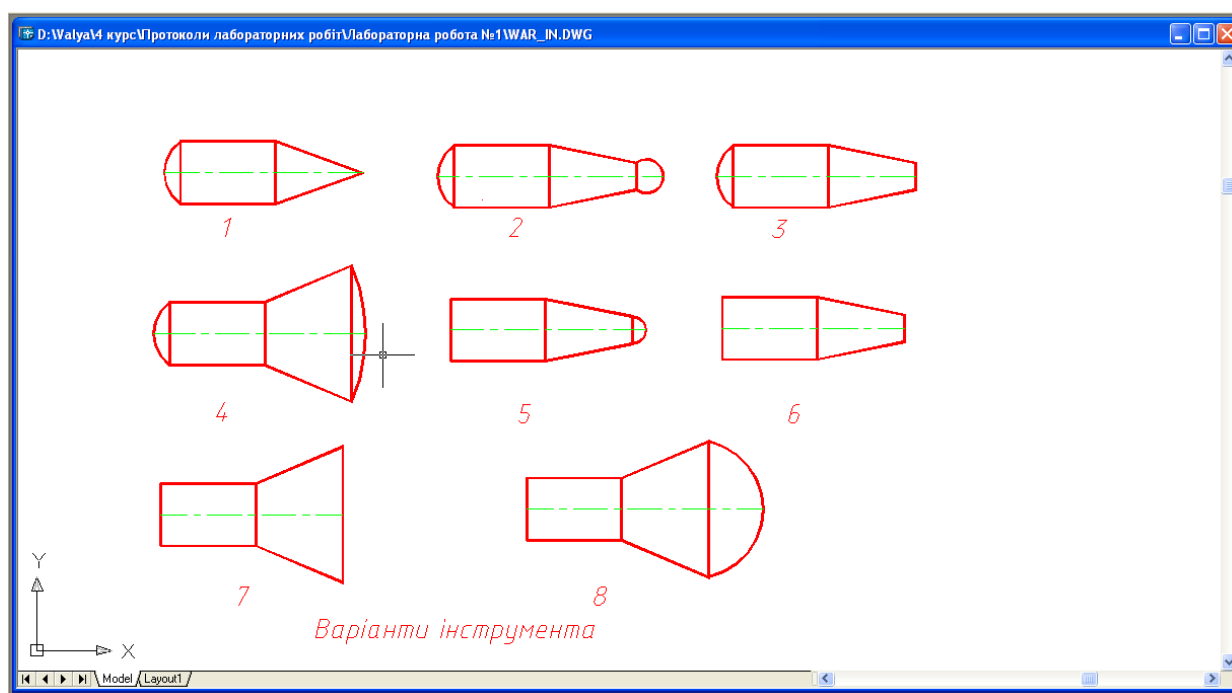
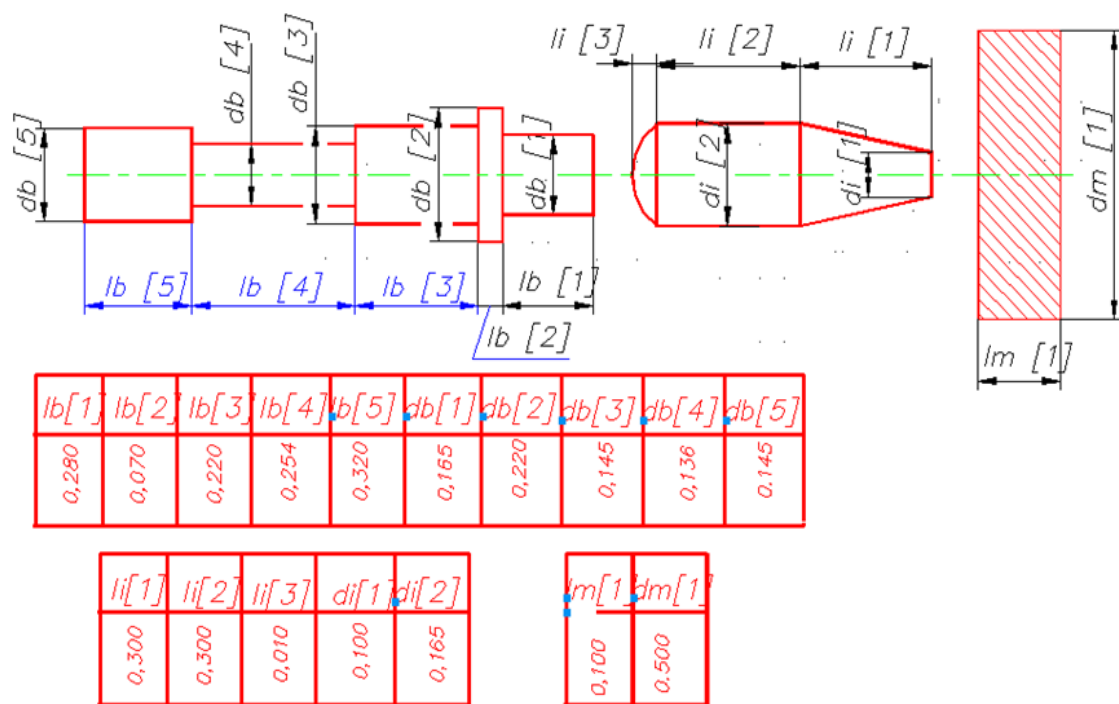


Рисунок Д.2 – Варіанти інструментів



Система "Бойок – інструмент – масив"

Рисунок Д.3 – Дані для системи "бойок – інструмент - масив".

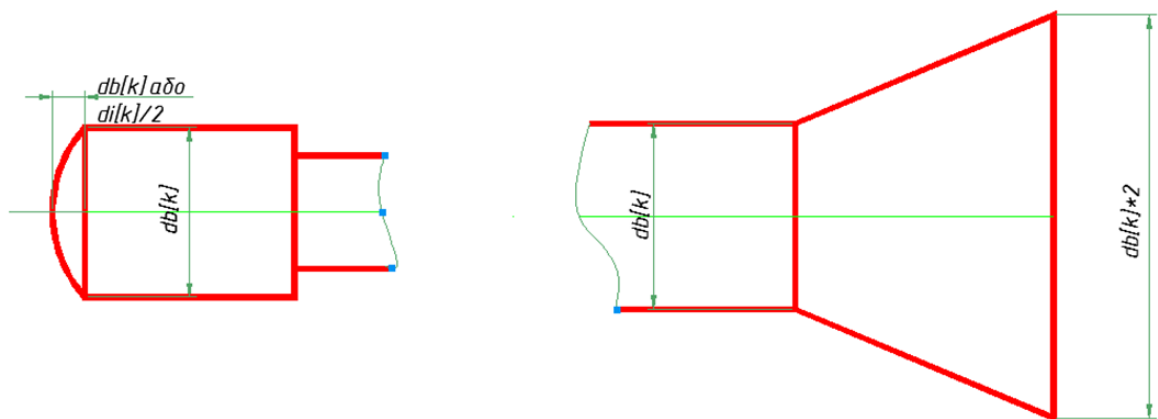


Рисунок Д.4 – Уточнення даних для системи "бойок – інструмент - масив".

Лабораторна робота №3

Визначення основних параметрів ударно-хвильової системи

1.Мета: підготовка параметрів моделі до обробки на персональному комп'ютері для формування і інтегрування диференціального рівняння руху зведеної маси.

2.Задачі:

1. Визначити жорсткість елементів (бойка, інструмента, масиву) за моделлю Гука та розрахувати зведену жорсткість;
2. Визначити маси бойка та інструмента, розрахувати зведену масу (еквівалентну масу);
3. Звести до еквівалентних зовнішні навантаження, визначити дисипацію, початкову фазу коливального процесу амплітуду і частоту навантаження в системі;
4. Виконати розрахунки вихідних параметрів в пакеті MathCAD;
5. Розробити програму мовою C# в оболонці Visual Studio та реалізувати її на ПК;
6. Порівняти результати розрахунків.

3. Основні теоретичні відомості

Модель – фізична система (пристрій, схема, установка, система машин) або математичний опис, компонентів і функцій, які відображають суттєві властивості об'єкта, процесу або явищ.

Моделювання – метод дослідження складних об'єктів, явищ або процесів на їх моделях чи на реальних установках з використанням методів теорії подібності при постановці і обробці експерименту [1].

Теорія подібності, як правило, застосовуються для фізичних моделей. Очевидно, що моделі можуть приймати різноманітну форму і описуватись різноманітним ступенем математичної деталізації, яку приймає дослідник.

Моделі можуть бути побудовані на системі чітких знань про об'єкти та явища і нечітких за умови, коли об'єкти та явища відносяться до нечітких множин. В першому випадку розглядаються точні математичні (детерміновані) або статистичні (ймовірності) моделі. В другому випадку розглядається клас моделей побудованих на нечітких множинах (знаннях), в яких введена лінгвістична змінна та обмеження у вигляді вагових коефіцієнтів. Такі моделі застосовуються в проблемі штучний інтелект.

Відомі різні типи моделей: графічні (за допомогою графіки), математичні (формули), комп'ютерні (програми).

Математичні – моделі, в яких співвідношення між системними виразами записуються у вигляді формул із застосуванням диференціальних рівнянь.

Імітаційні моделі – моделі реальних процесів, які враховують різноманітні зв'язки компонентів.

Способи формування моделей:

1. Розщеплення системи на такі підсистеми, властивості яких очевидні з раніше накопиченого досвіду. Формальне об'єднання таких підсистем стає моделлю системи. Такий підхід називається *моделюванням*. В його рамках проведення натуральних експериментів не обов'язково. Основний прийом моделювання зводиться до структуризації процесу у вигляді блок-схеми, блок яких складається з більш простих елементів. Процес синтезу системи за такими блоками часто використовується на ЕОМ.

2. Безпосереднє використання експериментальні данні, в ньому ведеться реєстрація входних і вихідних сигналів системи, а модель формується в результаті обробки відповідних даних. Такий спосіб називається ідентифікацією (розкриття структури). Відповідність – адекватність, тобто за певними параметрами можливе моделювання [1].

Процес створення моделі полягає в знаходженні складного з простого і видів зв'язку між ними, з описом, вивченням і поєднанням елементів в модель складного об'єкту. Причому спрощення моделі ведеться шляхом прийняття гіпотез.

В залежності від складності системи моделі бувають дискретними (точки) та суцільними (континуальні), рідше комбіновані.

Дискретні моделі за структурою складаються із зведених до заданої точки в динамічному відношенні мас, моментів інерції, жорсткостей, сил, моментів сил і т. ін., які на рисунках мають спеціальні позначення:



- зведена маса, m ;



- зведений момент інерції, I ;



- зведена жорсткість, c ;



- зведена дисипація, b ;



- зведена сила, N .

Будь-яка механічна система має безліч матеріальних точок і відповідно ступенів вільності, однак при моделюванні користуються спрощеними схемами, які характеризуються скінченим числом ступенів вільності. Причому найбільш легкі частини системи часто взагалі вважаються без масові, а інші зводяться в динамічному відношенні у зазначене місце системи, як зведені маси або моменти інерції. Зведення проводиться на основі принципів зведення. Зведені маси чи моменти інерції мають зв'язки у вигляді жорсткостей чи дисипативних елементів. При відсутності жорсткості та дисипації зв'язок має вигляд нескінченної жорсткості і являється упором.

Частіше такі моделі описуються системою звичайних диференціальних рівнянь. А одно масова модель описується одним диференціальним рівнянням другого порядку побудованого на основі реалізації принципу Д'Аламбера [2-5] .

Континуальна модель характеризується суцільним середовищем – твердим тілом, рідиною, які відображають основні властивості реальних об'єктів або

процесів. За допомогою континуальних моделей досліджують хвильові характеристики елементів машин та обладнання, гідроудари в трубах, теплові процеси.

Математичний апарат – система диференціальних рівнянь в частинних похідних, апарат задач математичної фізики.

3.1. Класичні типи моделей

До класичних типів – моделей Гука, Ньютона, Максвелла та Кельвіна, в залежності від поставлених задач досліджень можуть зводитись багатомасові електромеханічні системи.

Отже, формальна класифікація моделей ґрунтується на математичних засобах, що використовуються для розв'язання поставлених задач. Розрізняють моделі:

- лінійні або нелінійні моделі;
- зосереджені або розподілені системи;
- детерміновані або стохастичні;
- статичні або динамічні.

Існує ще декілька підходів. Разом з тим, кожна побудована модель є лінійною або нелінійною, детермінованою або стохастичною. Природно, що можливі і змішані типи: у одному відношенні зосереджені (за частиною параметрів), в іншому — розподілені моделі і так далі.

Розглянемо найбільш актуальні в інженерній практиці математичні моделі.

1. МОДЕЛЬ ГУКА

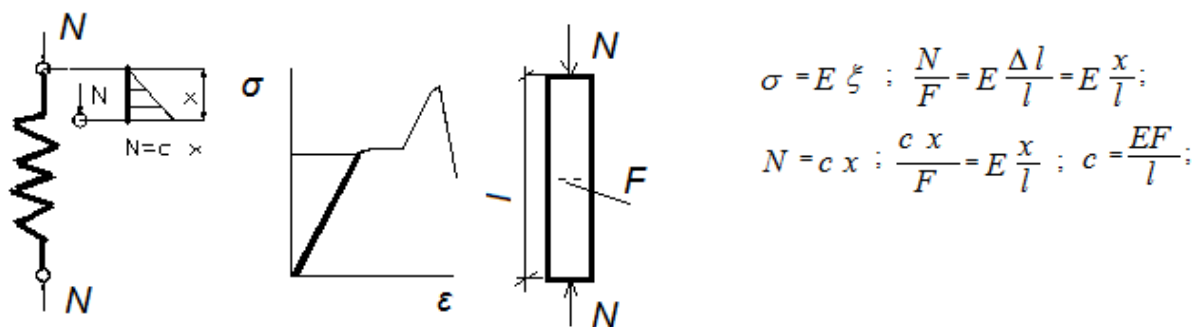


Рисунок 1 – Графічне та математичне відображення моделі Гука

2. МОДЕЛЬ НЬЮТОНА

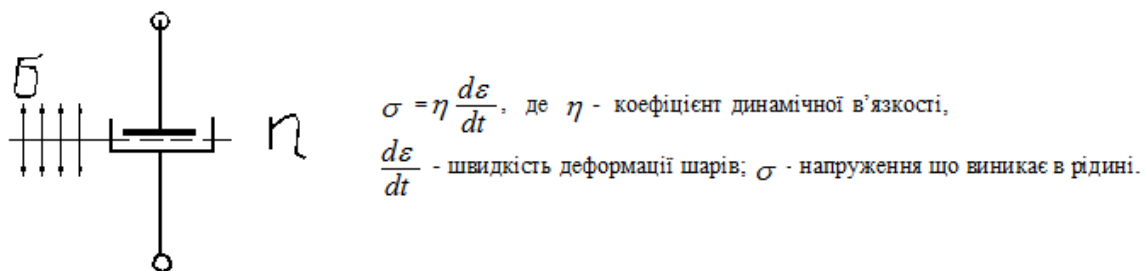
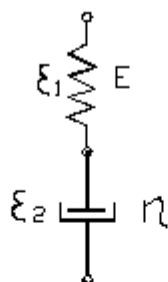


Рисунок 2 – Графічне та математичне відображення моделі Ньютона

МОДЕЛЬ МАКСВЕЛА



$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$$

$$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_1}{dt} + \frac{d\varepsilon_2}{dt}; \quad \frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{\sigma}{E} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt}; \quad \frac{d\varepsilon_2}{dt} = \frac{\sigma}{\eta};$$

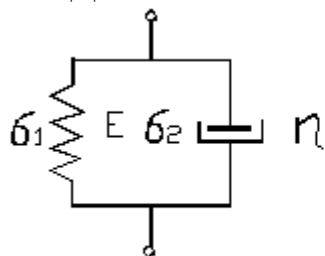
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta}.$$

Рисунок 3 – Графічне та математичне відображення моделі Максвела

Швидкість деформації прямопропорційна навантаженню

($\sigma = \frac{N}{F} = const$) і швидкості його зміни.

МОДЕЛЬ КЕЛЬВІНА (ФОЙХТА)



$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$$

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt}$$

Рисунок 4 – Графічне та математичне відображення моделі Кельвіна
КОМБІНОВАНІ МОДЕЛІ

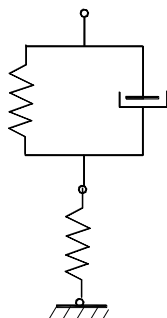


Рисунок 5 –Комбіновані моделі

Застосовуючи методи зведення мас, сил та жорсткостей можлива побудова масової моделі з навантаженням і класичною моделлю.

Розглянемо особливість зведення маси інструмента гідромолота.

Для зведення маси інструмента при ударній взаємодії “бойок – інструмент” приймається гіпотеза, що інструмент в процесі співудару з бойком деформується за лінійним законом, а швидкість деформації пропорційна переміщенню поперечних перерізів інструмента (рис.4). Точка зведення – точка контакту поверхонь бойка і інструмента (точка К). Кінетична енергія елементарної частини інструмента при співударі буде

$$dT = \rho S dx v(x)^2 / 2, \quad (1)$$

де ρ - густина матеріалу інструмента, S – площа поперечного перерізу інструмента, dx – довжина елементарної частини інструмента, $v(x)$ – швидкість елементарної маси ($\rho S dx$) частини інструмента.

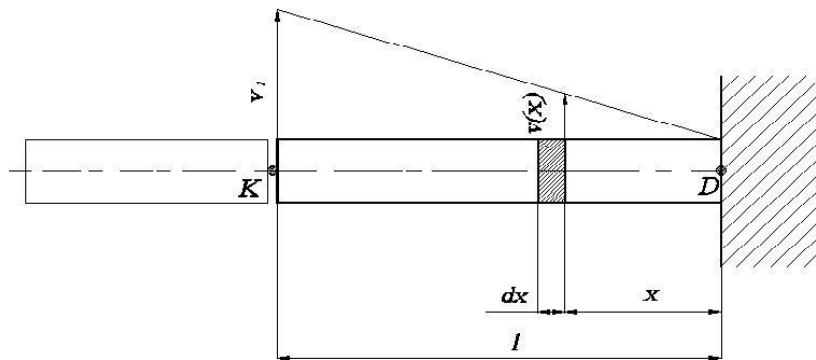


Рисунок 6 –Розрахункова схема для визначення зведеної маси інструмента

Враховуючи лінійний закон деформації інструмента, очевидна пропорція

$$\frac{v(x)}{v_1} = \frac{x}{l}, \quad \text{звідки} \quad v(x) = \frac{x v_1}{l}. \quad \text{Підставивши } v(x) \text{ в (1) отримаємо}$$

$$dT = \frac{\rho S v_1^2}{2l^2} x^2 dx. \quad (2)$$

Сумарне значення кінетичної енергії визначиться з (2) інтегруванням по повній довжині інструмента.

$$T_c = \int_0^l dT = \frac{\rho S v_1^2}{2l^2} \int_0^l x^2 dx = \frac{\rho S v_1^2 l^3}{2l^2 \cdot 3} = \frac{\rho S l v_1^2}{2 \cdot 3} = \frac{m_g v_1^2}{2 \cdot 3}, \quad (3)$$

де m_g - повна маса інструмента (“геометрична” маса). Еквівалентна або зведена маса інструмента визначається за принципом рівності кінетичної енергії еквівалентної маси сумарній кінетичній енергії, тобто $T_{екв} = T_c$. Тоді

$$T_{екв} = \frac{m_{екв} v_1^2}{2} = \frac{m_z v_1^2}{2 \cdot 3}, \text{ звідки еквівалентна маса інструмента визначається}$$

$m_{екв} = \frac{m_z}{3}$, тобто еквівалентна маса інструмента, яка приймає участь у співударі з бойком втричі менша за геометричну масу інструмента.

3.2. Визначення параметрів системи (приклад)

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} - \text{загальна жорсткість системи};$$

$$C = \frac{EF}{l} - \text{формула визначення жорсткості окремого елемента};$$

$$E = 2 \cdot 10^{11} \frac{H}{M^2} - \text{модуль Юнга};$$

F – площа перерізу окремого елемента;

l – довжина окремого елемента.

3.3. Визначення жорсткості елементів

$$1. C_1 = E \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4 \cdot l_1} = \frac{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 3,14 \cdot 145^2}{4 \cdot 320} = 1,084 \cdot 10^{10} \frac{H}{M};$$

$$2. C_2 = E \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2}{4 \cdot l_2} = \frac{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 3,14 \cdot 136^2}{4 \cdot 254} = 1,201 \cdot 10^{10} \frac{H}{M};$$

$$3. C_3 = E \cdot \frac{\pi \cdot d_3^2}{4 \cdot l_3} = \frac{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 3,14 \cdot 145^2}{4 \cdot 140} = 2,477 \cdot 10^{10} \frac{H}{M};$$

$$4. C_4 = E \cdot \frac{\pi \cdot d_4^2}{4 \cdot l_4} = \frac{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 3,14 \cdot 181^2}{4 \cdot 220} = 2,456 \cdot 10^{10} \frac{H}{M};$$

$$5. C_5 = E \cdot \frac{\pi \cdot d_5^2}{4 \cdot l_5} = \frac{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 3,14 \cdot 165^2}{4 \cdot 280} = 1,604 \cdot 10^{10} \frac{H}{M};$$

6. Шостий елемент є сферою, для того щоб порахувати його жорсткість спростимо його до циліндру з радіусом $R_o = \frac{2}{3} \cdot R_{i \text{ н і н о}}$.

$$d_6 = \frac{4}{3} \cdot R_{6 \text{ н о а д е}} = \frac{4}{3} \cdot \frac{d_5}{2} = \frac{4}{3} \cdot \frac{165}{2} = 110 \text{ мм},$$

тоді жорсткість шостого елемента:

$$C_6 = E \cdot \frac{\pi \cdot d_6^2}{4 \cdot l_6} = \frac{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 3,14 \cdot 110^2}{4 \cdot 10} = 19,957 \cdot 10^{10} \frac{H}{M}.$$

Зведена жорсткість бойка:

$$\frac{1}{C_{\hat{a}\hat{i}\hat{e}\hat{i}\hat{e}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} = \frac{1}{\tilde{N}_1} + \frac{1}{\tilde{N}_2} + \frac{1}{\tilde{N}_3} + \frac{1}{\tilde{N}_4} + \frac{1}{\tilde{N}_5} + \frac{1}{\tilde{N}_6} =$$

$$= \left(\frac{1}{1,084} + \frac{1}{1,201} + \frac{1}{2,477} + \frac{1}{2,456} + \frac{1}{1,604} + \frac{1}{19,957} \right) \cdot 10^{-10} = 3,24 \cdot 10^{-10} \frac{\dot{I}}{\dot{i}}$$

$$C_{\hat{a}\hat{i}\hat{e}\hat{i}\hat{e}} = \frac{1}{3,24 \cdot 10^{-10}} = 3,087 \cdot 10^9 \frac{\dot{I}}{\dot{i}}$$

Визначення жорсткості інструмента:

$$1. C_7 = E \cdot \frac{\pi \cdot d_7^2}{4 \cdot l_7} = \frac{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 3,14 \cdot 165^2}{4 \cdot 300} = 1,497 \cdot 10^{10} \frac{\dot{I}}{\dot{i}};$$

2. Восьмий елемент є конусом, для спрощення розрахунків спростимо його до циліндра.

$$R_8 = R_{\hat{e}\hat{i}\hat{a}\hat{i}} + (R_{\hat{e}\hat{a}\hat{e}} - R_{\hat{e}\hat{i}\hat{a}\hat{i}}) / 2$$

$$R_8 = 100 + \frac{165 - 100}{2} = 132,5 \dot{i}$$

$$C_8 = E \cdot \frac{\pi \cdot d_8^2}{4 \cdot l_8} = \frac{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 3,14 \cdot 132,5^2}{4 \cdot 300} = 0,965 \cdot 10^{10} \frac{\dot{I}}{\dot{i}}$$

3. З третім елементом проводимо такі ж перетворення як і з шостим.

$$d_8 = \frac{4}{3} \cdot R_{\hat{e}\hat{n}\hat{o}\hat{a}\hat{d}\hat{e}} = \frac{4}{3} \cdot \frac{d_7}{2} = \frac{4}{3} \cdot \frac{100}{2} = 66,7 \dot{i},$$

тоді жорсткість восьмого елемента:

$$C_8 = E \cdot \frac{\pi \cdot d_8^2}{4 \cdot l_8} = \frac{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 3,14 \cdot 110^2}{4 \cdot 10} = 7,34 \cdot 10^{10} \frac{\dot{I}}{\dot{i}}.$$

Зведена жорсткість інструменту:

$$\frac{1}{C_{\hat{z}\hat{i}\hat{n}\hat{o}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} = \frac{1}{\tilde{N}_7} + \frac{1}{\tilde{N}_8} + \frac{1}{\tilde{N}_9} =$$

$$= \left(\frac{1}{1,497} + \frac{1}{0,965} + \frac{1}{7,34} \right) \cdot 10^{-10} = 0,98 \cdot 10^{-10} \frac{\dot{I}}{\dot{i}}$$

$$C_{\hat{z}\hat{i}\hat{n}\hat{o}} = \frac{1}{0,98 \cdot 10^{-10}} = 1,02 \cdot 10^{10} \frac{\dot{I}}{\dot{i}}$$

Жорсткість масиву приймаємо:

$$\tilde{N}_{\hat{i}\hat{a}\hat{n}\hat{e}\hat{a}} = 4,9 \cdot 10^6 \frac{H}{\dot{i}}$$

Зведена жорсткість всієї системи:

$$\frac{1}{C_{\Sigma}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} = \frac{1}{\tilde{N}_{\hat{\imath} \hat{\imath} \hat{\imath}}} + \frac{1}{\tilde{N}_{\hat{\imath} \hat{\imath} \hat{\imath}}} + \frac{1}{\tilde{N}_{\hat{\imath} \hat{\imath} \hat{\imath}}} =$$

$$= \left(\frac{1}{1,02} + \frac{1}{0,309} + \frac{1}{0,00049} \right) \cdot 10^{-10} = 2,04 \cdot 10^{-7}$$

$$C_{\Sigma} = \frac{1}{2,04 \cdot 10^{-7}} = 4,89 \cdot 10^6 \frac{\hat{\imath}}{\hat{\imath}}$$

3.4. Визначення маси елементів

$m = \rho \cdot V$ - формула визначення маси;

$\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ - густина для сталі.

$m_i = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \cdot l_i \cdot \rho$ - визначення маси для конуса;

$m_i = \pi \cdot l_i^2 \cdot \left(R - \frac{l_i}{3} \right) \cdot \rho$ - визначення маси для сфери,

де R - радіус сфери, який визначається за формулою:

$$R_i = \frac{(R_{i \hat{\imath} \hat{\imath}})^2 + l_i^2}{2 \cdot l_i};$$

$m_i = \frac{1}{3} \pi \cdot l_i \cdot (r_1^2 + r_1 \cdot r_2 + r_2^2) \cdot \rho$ - визначення маси для конуса, де r_1, r_2 - радіуси основ конуса.

Визначення маси бойка:

$$1. m_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot l_1 \cdot \rho = \frac{3,14 \cdot 7800}{4} \cdot 0,145^2 \cdot 0,320 = 41,2 \hat{\imath} \hat{\imath};$$

$$2. m_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \cdot l_2 \cdot \rho = \frac{3,14 \cdot 7800}{4} \cdot 0,136^2 \cdot 0,254 = 28,8 \hat{\imath} \hat{\imath};$$

$$3. m_3 = \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} \cdot l_3 \cdot \rho = \frac{3,14 \cdot 7800}{4} \cdot 0,145^2 \cdot 0,140 = 18,03 \hat{\imath} \hat{\imath};$$

$$4. m_4 = \frac{\pi \cdot d_4^2}{4} \cdot l_4 \cdot \rho = \frac{3,14 \cdot 7800}{4} \cdot 0,181^2 \cdot 0,220 = 44,2 \hat{\imath} \hat{\imath};$$

$$5. m_5 = \frac{\pi \cdot d_5^2}{4} \cdot l_5 \cdot \rho = \frac{3,14 \cdot 7800}{4} \cdot 0,165^2 \cdot 0,280 = 46,7 \hat{\imath} \hat{\imath};$$

$$6. R_6 = \frac{(R_{i \hat{\imath} \hat{\imath}})^2 + l_6^2}{2 \cdot l_6} = \frac{(0,165/2)^2 + 0,010^2}{2 \cdot 0,010} = 0,345 \hat{\imath}$$

$$m_6 = \pi \cdot l_6^2 \cdot \left(R - \frac{l_6}{3} \right) \cdot \rho = 3,14 \cdot 0,010^2 \cdot \left(0,345 - \frac{0,010}{3} \right) \cdot 7800 = 0,837 \hat{\imath} \hat{\imath}$$

Загальна маса бойка:

$$m_{\hat{\imath} \hat{\imath} \hat{\imath}} = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 = 41,2 + 28,78 + 18,03 + 44,2 + 46,7 + 0,837 = 179,7 \hat{\imath} \hat{\imath}$$

Визначення маси інструменту

$$1. m_7 = \frac{\pi \cdot d_7^2}{4} \cdot l_7 \cdot \rho = \frac{3,14 \cdot 7800}{4} \cdot 0,165^2 \cdot 0,300 = 50 \hat{\imath} \hat{\imath}$$

$$2. m_8 = \frac{1}{3} \pi \cdot l_8 \cdot (r_1^2 + r_1 \cdot r_2 + r_2^2) \cdot \rho = \frac{1}{3} \cdot 0,3 \cdot \left(\frac{0,165^2}{4} + \frac{0,165 \cdot 0,1}{4} + \frac{0,1^2}{4} \right) \cdot 7800 = 32,9 \text{ êã}$$

$$3. R_6 = \frac{(R_{i\tilde{u}})^2 + l_6^2}{2 \cdot l_6} = \frac{(0,100/2)^2 + 0,010^2}{2 \cdot 0,010} = 0,13 \text{ ì}$$

$$m_6 = \pi \cdot l_6^2 \cdot \left(R - \frac{l_6}{3} \right) \cdot \rho = 3,14 \cdot 0,010^2 \cdot \left(0,13 - \frac{0,010}{3} \right) \cdot 7800 = 0,310 \text{ êã}$$

Загальна маса інструменту:

$$m_{i\tilde{u}\tilde{o}} = m_1 + m_2 + m_3 = 50 + 32,9 + 0,310 = 83,21 \text{ êã}$$

Визначення зведеної маси системи:

$$m = m_{\tilde{u}\tilde{e}\tilde{e}} + \frac{1}{3} m_{i\tilde{u}\tilde{o}} = 179,7 + \frac{1}{3} 83,21 = 207,437 \text{ êã}$$

3.5. Визначення коефіцієнта дисипації

ВАРІАНТ 1. Декремент затухання визначається відношенням сусідніх максимальних амплітуд $\Delta = A_1 / A_2$. В загальному випадку $A_1 = A \cdot e^{-k \cdot t}$, і відповідно, з урахуванням збільшення часу t на період T наступна максимальна амплітуда - $A_2 = A \cdot e^{-k(t+T)}$. Тоді декремент затухань визначиться [6]

$$\Delta = \frac{A_1}{A_2} = \frac{A \cdot e^{-k \cdot t}}{A \cdot e^{-k(t+T)}} = e^{k \cdot T}.$$

Відповідно логарифмічний декремент затухань буде

$\ln \Delta = \ln e^{k \cdot T} = k \cdot T \cdot \ln e = k \cdot T$. Отже, коефіцієнт дисипації можна визначити за даними експериментальних досліджень

$$k = \frac{\ln \Delta}{T} = \frac{\ln \Delta}{T_\omega} = \frac{\ln \Delta \cdot k_1}{2 \cdot \pi} = \frac{\ln \Delta \cdot \sqrt{\omega^2 - k^2}}{2 \cdot \pi},$$

де T_ω - круговий період.

$$k = \frac{\ln \Delta \cdot \sqrt{\omega^2 - k^2}}{2 \cdot \pi} \rightarrow 4\pi^2 k^2 = \ln^2 \Delta \cdot (\omega^2 - k^2) \rightarrow k^2 (4\pi^2 + \ln^2 \Delta) = \ln^2 \Delta \cdot \omega^2.$$

Звідки визначається:
$$k = \frac{\ln \Delta \cdot \omega}{\sqrt{4 \cdot \pi^2 + \ln^2 \Delta}}.$$

1. ПРЯМЕ ВИЗНАЧЕННЯ

$$\omega = 153.536 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad \Delta := 1.2$$

$$kk(\Delta) := \frac{\ln(\Delta) \cdot \omega}{\sqrt{4 \cdot \pi^2 + \ln(\Delta)^2}} \quad kk(\Delta) = 4.453 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Рисунок 7 – Пряме визначення коефіцієнта дисипації

ВАРІАНТ 2. Розрахунок коефіцієнта дисипація програмним способом з використанням законтурних ітерацій зі стабілізацією процесу обчислень [7]

РОЗРАХУНОК КОЕФІЦІЄНТА ДИСИПАЦІЇ

1. ВАРІАНТ ІТЕРАЦІЙНИЙ

$$m_{zv} := 207.437 \text{ кг} \quad c_{zv} := 4.89 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

$$\omega := \sqrt{\frac{c_{zv}}{m_{zv}}} \quad \omega = 153.536 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad \Delta := 1.2$$

Приймасмо $k := 0 \quad k1 := \sqrt{\omega^2 - k^2}$

$k :=$

```

i ← 0
for i ∈ 1..5
    T ← 2·π / k1
    k ← ln(Δ) / T
    k1 ← √(ω2 - k2)
    k ← ln(Δ) / T    k = 4.453    рад / с    k1 = 153.536    рад / с
    
```

Рисунок 8 - Програмний модуль визначення коефіцієнта дисипації: $k = F(\Delta, \text{параметри})$

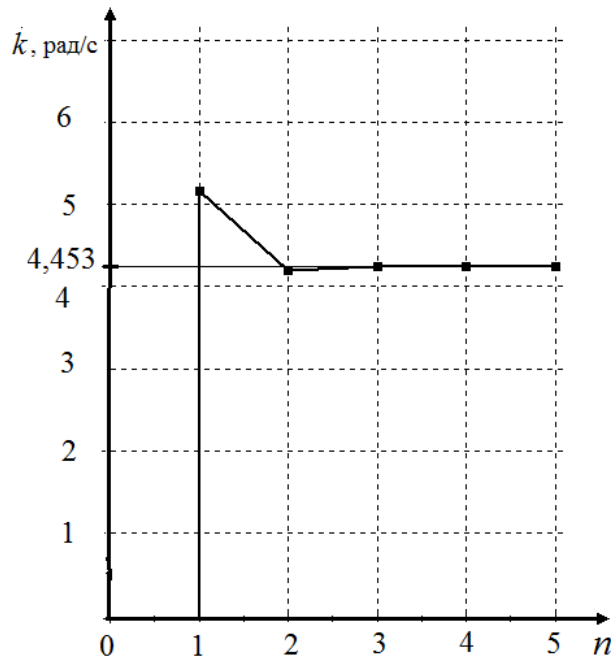


Рисунок 9 - Відображення ітераційного процесу

3.7.Зовнішні навантаження

$$\sigma = 450 \text{ МПа}$$

$$P_0 = \tau_{\text{дир}} \cdot F_{\text{мін}}$$

$$x_p = P_0 / c$$

1 умова – реалізація максимального удару:

$v_0 = 10 \text{ м/с}$ - швидкість руху бойка

$$E_{\text{д}} = \frac{m_{\text{д}} \cdot v_{\text{д}}^2}{2} = \frac{179,7 \cdot 10^2}{2} = 8985 \text{ Дж}$$

$$X_p = \sqrt{\frac{2 \cdot 8985}{4,89 \cdot 10^6}} = 0,0606 \text{ м}$$

2 умова - за умови забезпечення міцності одного найслабшого елемента:

$$\sigma_{\text{дон}} = 450 \text{ МПа}$$

$$F_{\text{мін}} = 0,014 \text{ м}^2$$

$$P_p = F_{\text{мін}} \cdot \sigma_{\text{дир}} = 0,014 \cdot 450 \cdot 10^6 = 6,3$$

$$X_p = \frac{P_p}{C_{\Sigma}} = \frac{6,3 \cdot 10^6}{4,89 \cdot 10^6} = 1,288 \text{ м}$$

вибираємо менше значення X_p :

$$X_{p \text{ мин}} = 0,0606 \text{ м}$$

Визначаємо амплітуду зовнішніх коливань:

$$a = \frac{P_p}{m} = \frac{\tilde{N}_{\Sigma} \cdot X_{p \text{ мин}}}{m} = \frac{4,89 \cdot 10^6 \cdot 0,0606}{207,437} = 1428,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

Визначаємо частоту зовнішніх навантажень:

$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot n_{\dot{\alpha}\ddot{\alpha}} = 2 \cdot 3.14 \cdot 5 = 31.416 \frac{\partial \ddot{\alpha}}{\tilde{n}}$$

$$n_{\dot{\alpha}\ddot{\alpha}} = 300 \frac{1}{\partial \hat{\alpha}} = 5 \frac{1}{c}$$

$$n_{\ddot{\alpha}\partial\dot{\alpha}} = \frac{k_{1\max}}{\omega_1} = \frac{154}{31.416} = 4,901 \approx 5$$

Кінцеве розрахункове значення частоти зовнішніх навантажень:

$$\omega_{1p} = n_{\ddot{\alpha}\partial\dot{\alpha}} \cdot \omega_1 = 5 \cdot 31.416 = 157.08 \frac{\partial \ddot{\alpha}}{\tilde{n}}$$

4. Інформаційне та технічне забезпечення:

4.1. Конспект лекцій з курсу “Математичне моделювання та ідентифікація електромеханічних систем”.

4.2. Конспект лекцій з курсу “Обчислювальна техніка та програмування”

4.3. Методичні вказівки з курсу “Математичне моделювання та ідентифікація електромеханічних систем” [6].

4.4. Персональний комп'ютер з пакетами MathCAD та Visual Studio C#.

4.5. Демонстраційна програма до лабораторних робіт з курсу.

5. Заходи безпеки при виконанні лабораторної роботи

Лабораторна робота виконується в комп'ютерному класі. Інструктаж щодо виконання лабораторних робіт проводиться на першому занятті і фіксується в журналі техніки безпеки.

6. Порядок виконання лабораторної роботи

6.1. В пакеті MathCAD розрахувати параметри вказані в задачах.

6.2. В середовищі Visual Studio C# розробити програму розрахунку вказаних параметрів з урахуванням передачі цих даних в наступну лабораторну роботу (зовнішні та внутрішні змінні)

6.3. Порівняти результати розрахунків

7. Оформлення звіту та порядок його подання

Якщо лабораторна робота виконана на комп'ютері і перевірена викладачем, наступний етап - підготовка звіту та його захист. Звіт оформляється згідно вимог щодо оформлення звітів.

Захист лабораторної роботи відбувається на наступному занятті.

Звіт складається з таких розділів:

1. Назва лабораторної роботи.
2. Мета лабораторної роботи.
3. Задачі лабораторної роботи.
4. Теоретичні відомості до виконання лабораторної роботи.

5. Інформаційне та технічне забезпечення.
6. Розрахунки в MathCAD .
7. Програма розрахунків в середовищі Visual Studio C#.
8. Результат роботи програми (інтерфейс).

Висновки.

8. Контрольні запитання для підготовки до лабораторної роботи :

- Що таке модель?
- Що таке моделювання?
- Типи моделей.
- Способи формування моделей.
- Що таке дискретна модель?
- Що таке континуальна модель?
- Типи класичних моделей.
- Що таке динамічна система?
- Що таке системний аналіз?
- Основні етапи системного аналізу.
- Що таке замкнена і відкрита системи?

9. Список рекомендованої літератури

1. Льюинг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: Пер. с англ./Под ред. Я.З. Цыпсина. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. -432 с.
2. Быховский И.И., Гольдштейн Б.Г. Основы конструирования вибробезопасных ручных машин.-М.: Машиностроение-1982. -224 с
3. Стабілізація функціонування гірничої машини з імпульсним виконавчим органом/ Сліденко В.М., Шевчук С.П. -К.: , 2010 -192 с.
4. Сліденко В.М. Математичне моделювання ударно-хвильових процесів гідроімпульсних систем гірничих машин: монографія / В.М. Сліденко, О. М. Сліденко – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во “Політехніка”, 2017. – 220 с.
5. Адаптивне функціонування імпульсних виконавчих органів гірничих машин / Сліденко В.М., Шевчук С.П., Замараєва О.В., Лістовщик Л.К. -К.: НТУУ "КПІ", 2013 -179 с.
6. Потужна дисипація енергії коливань гірничих машин гетерогенними ліофобними системами/ Єрошенко В.А., Сліденко В.М., Шевчук С.П., Студенець В.П. - К.: НТУУ "КПІ", 2016 -180 с.
7. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Математичне моделювання електромеханічних систем” для студентів напряму підготовки 6.050702 ”Електромеханіка” [Електронний ресурс]/ НТУУ ”КПІ”; уклад. В.М. Сліденко, В.О. Поліщук. –Електронні текстові дані (1 файл: 940 Кбайт). – К.: НТУУ “КПІ”, 2013. -43 с. – Назва з екрана. – Доступ : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/7577>

Лабораторна робота №4

Дослідження перехідного процесу

1. Мета: дослідити перехідні процеси на основі інтегрування диференційного рівняння 2-го порядку з постійними коефіцієнтами та спеціальною правою частиною.

2. Задачі:

- 2.1. Сформувати математичну модель перехідного процесу, систематизувавши необхідні параметри та функції.
- 2.2. Побудувати графік коливань в MathCAD.
- 2.3. Розробити програму мовою C# в оболонці Visual Studio та реалізувати її на ПК;
- 2.4. Проаналізувати та порівняти результати розрахунків.

3. Основні теоретичні відомості

Використовуючи правило зведення мас, моментів інерції, сил, жорсткостей та дисипації, можна побудувати одну масову модель динамічної системи і записати рівняння руху. За метод побудови рівняння руху одно масової моделі використовується метод Даламбера. Принцип Даламбера є одним із основних принципів динаміки якщо до діючих на точки механічної системи заданих (активних) сил і реакцій зв'язку приєднати даламберові сили інерції, то вийде врівноважена система сил. Принцип Даламбера дозволяє розв'язувати задачі динаміки методами статички [1].

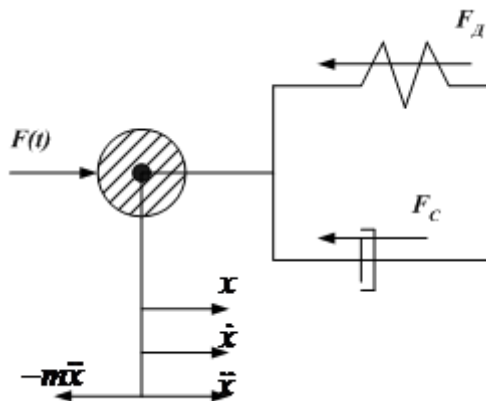


Рисунок 1 – Розрахункова схема на основі класичної моделі Кельвіна (Фойхта)

Статичне рівняння з урахуванням даламберової сили інерції

$$\sum F_i - m \cdot \ddot{x} = 0$$

$$F(t) - m \cdot \ddot{x} - b \cdot \dot{x} - c \cdot x = 0$$

$$m \cdot \ddot{x} + b \cdot \dot{x} + c \cdot x = F(t)$$

$$\ddot{x} + \frac{b}{m} \cdot \dot{x} + \frac{c}{m} \cdot x = \frac{F(t)}{m}.$$

Позначимо

$$\frac{b}{m} = 2k, \frac{c}{m} = \omega^2, \frac{F(t)}{m} = a(t),$$

де $\omega = \sqrt{\frac{c}{m}}$ - частота власних коливань без врахування дисипації.

Тобто ми перейшли від рівняння сил до рівняння прискорення.

$$a(t) = a \cdot \sin(\omega_1 \cdot t)$$

В результаті отримуємо:

$$\ddot{x} + 2k \cdot \dot{x} + \omega^2 \cdot x = a \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) \quad (1)$$

Диференціальне рівняння (1) відносять до класу диференціальних рівнянь другого порядку з постійними коефіцієнтами і з спеціальною правою частиною. Таке рівняння має точний розв'язок, який складається із загального розв'язку однорідного рівняння (2) і частинного розв'язку неоднорідного рівняння (1) [2-3].

$$\ddot{x} + 2k \cdot \dot{x} + \omega^2 \cdot x = 0 \quad (2)$$

Тобто

$$X_{\text{заг}(1)} = X_{\text{заг}(2)} + X_{\text{ч}(1)}.$$

Характеристичне рівняння:

$$r^2 + 2k \cdot r + \omega^2 = 0,$$

його розв'язком є $r_{1,2} = -k \pm \sqrt{k^2 - \omega^2}$.

Можливі три випадки:

$$1) \ k > \omega, r_1, r_2 < 0$$

$$r_1 = -\delta_1, r_2 = -\delta_2$$

$$x = C_1 e^{-\delta_1 \cdot t} + C_2 e^{-\delta_2 \cdot t}$$

Для цього випадку ніякого коливального руху в системі немає і очевидно, що із збільшенням t , зменшується x , ш при $t \rightarrow \infty$, $x \rightarrow 0$.

$$2) \ k = \omega$$

$$r_1 = r_2 = -k$$

$$x = e^{-k \cdot t} (C_1 \cdot t + C_2)$$

В цьому випадку коливального руху немає і маємо справу з неперіодичним затухаючим рухом.

$$3) \ k < \omega$$

$$r_{1,2} = -k \pm j \cdot \sqrt{\omega^2 - k^2} = \alpha \pm j\beta$$

$$\alpha = -k$$

$$\beta = \sqrt{\omega^2 - k^2}$$

k_1 – частота власних затухаючих коливань, тобто коливань з урахуванням дисипації.

Тоді загальний розв'язок (3.2):

$$x = e^{-kt} (C_1 \cdot \cos(k_1 \cdot t) + C_2 \cdot \sin(k_1 \cdot t))$$

Замінімо

$$A = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}$$

$$\varphi_0 = \arctg \frac{C_1}{C_2}$$

Для приведення системи в більш зручну форму, вводяться заміни:

$$C_1 = A \cdot \sin \varphi_0$$

$$C_2 = A \cdot \cos \varphi_0$$

Тоді розв'язок:

$$x = A \cdot e^{-k \cdot t} (\sin \varphi_0 \cdot \cos k_1 t + \cos \varphi_0 \cdot \sin k_1 t)$$

$$X_{\text{заз}(2)} = A \cdot e^{-k \cdot t} \cdot \sin(k_1 t + \varphi_0)$$

Виходячи з розв'язку однорідного диференційного рівняння, рух в системі без зовнішнього навантаження є періодичний затухаючий рух.

Частинний розв'язок (1) виконується за допомогою методу невизначених коефіцієнтів, він шукається у формі:

$$x = M \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) + N \cdot \sin(\omega_1 \cdot t)$$

$$\dot{x} = -\omega_1 \cdot M \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) + \omega_1 \cdot N \cdot \cos(\omega_1 \cdot t)$$

$$\ddot{x} = -\omega_1^2 \cdot M \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) - \omega_1^2 \cdot N \cdot \sin(\omega_1 \cdot t)$$

Якщо підставити в (1), отримаємо:

$$-\omega_1^2 \cdot M \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) - \omega_1^2 \cdot N \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) + 2k \cdot (-\omega_1 \cdot M \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) + \omega_1 \cdot N \cdot \cos(\omega_1 \cdot t)) + \omega^2 \cdot (M \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) + N \cdot \sin(\omega_1 \cdot t)) = a \cdot \sin(\omega_1 \cdot t)$$

Порівнюємо коефіцієнти при \cos і \sin :

$$\sin(\omega_1 \cdot t) \cdot (-\omega_1^2 \cdot N - 2k \cdot \omega_1 \cdot M + \omega^2 \cdot N) + \cos(\omega_1 \cdot t) \cdot (-\omega_1^2 \cdot M + 2k \cdot \omega_1 \cdot N + \omega^2 \cdot M) = a \cdot \sin(\omega_1 \cdot t)$$

Отже отримуємо систему:

$$\begin{cases} -\omega_1^2 \cdot N - 2k \cdot \omega_1 \cdot M + \omega^2 \cdot N = a \\ -\omega_1^2 \cdot M + 2k \cdot \omega_1 \cdot N + \omega^2 \cdot M = 0 \end{cases};$$

$$\begin{cases} (\omega^2 - \omega_1^2) \cdot N - 2k \cdot \omega_1 \cdot M = a \\ (\omega^2 - \omega_1^2) \cdot M + 2k \cdot \omega_1 \cdot N = 0 \end{cases};$$

Розв'язком системи буде:

$$\begin{cases} N = \frac{a \cdot (\omega^2 - \omega_1^2)}{(\omega^2 - \omega_1^2)^2 + 4k^2 \cdot \omega_1^2} \\ M = -\frac{2k \cdot \omega_1 \cdot a}{(\omega^2 - \omega_1^2)^2 + 4k^2 \cdot \omega_1^2} \end{cases}$$

Враховуючи загальний розв'язок за правою частиною введемо заміни:

$$M = A_1 \cdot \sin \varphi_1, \quad N = A_1 \cdot \cos \varphi_1$$

$$A_1 = \sqrt{M^2 + N^2}, \quad \varphi_1 = \arctg \frac{M}{N}$$

Тоді

$$\begin{aligned} X_{\div(1)} &= A_1 \cdot (\sin \varphi_1 \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) + \cos \varphi_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t)) \\ X_{\div(1)} &= A_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t + \varphi_1) \end{aligned} \quad (3)$$

Розв'язок (3) показує, що ми маємо справу з гармонічними незатухаючими коливаннями.

Тоді загальний розв'язок (1) буде:

$$X_{\text{заг}(1)} = A \cdot e^{-k \cdot t} \cdot \sin(k_1 t + \varphi_0) + A_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t + \varphi_1)$$

Будь-яке вимушене коливання є результатом накладання власного коливання і якого-небудь наперед вибраного вимушеного коливання. на початку процесу переваги може мати вільне коливання і з часом, при дії вимушуючи сили, процес стабілізується і поступово переходить в вимушені коливання. Перша стадія називається перехідним процесом.

Приклад ідентифікації перехідного процесу

Рівняння руху одно масової моделі:

$$\ddot{x} + 2k \cdot \dot{x} + \omega^2 \cdot x = a \cdot \sin(\omega_1 \cdot t)$$

Знаходимо розв'язок загального однорідного рівняння:

$$\ddot{x} + 2k \cdot \dot{x} + \omega^2 \cdot x = 0$$

Для цього складемо і вирішимо відповідне характеристичне рівняння.

$$r^2 + 2k \cdot r + \omega^2 = 0$$

Скористаємося визначеними з попередньої лабораторної роботи

параметрами:

$$k = 26,09 \text{ 1/с},$$

частота власних коливань без дисипації $\omega = 145,48 \text{ 1/с},$

частота зовнішніх коливань $\omega_1 = 157,08 \text{ 1/с},$

амплітуда зовнішніх коливань $a = 1280,55 \text{ Н/кг}.$

$$r_{1,2} = -26,09 \pm \sqrt{26,09^2 - 31,416^2} = -26,09 \pm j17,5$$

$$x_{\text{заг}(2)} = A e^{-26,09t} (C_1 \cdot \cos(17,5 \cdot t) + C_2 \cdot \sin(17,5 \cdot t))$$

$$A = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} = X_{p\min} = 0,0607$$

$$\varphi_0 = \arctg \frac{C_1}{C_2} = 90^\circ$$

$$X_{\text{заз}(2)} = A \cdot e^{-k \cdot t} \cdot \sin(k_1 \cdot t + \varphi_0) = 0.0607 \cdot e^{-26.09 \cdot t} \cdot \sin(145 \cdot t + 90)$$

Знаходимо частинний розв'язок рівняння:

$$X_{\text{з}(1)} = A_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t + \phi_1)$$

$$N = \frac{a \cdot (\omega^2 - \omega_1^2)}{(\omega^2 - \omega_1^2)^2 + 4k^2 \cdot \omega_1^2} = \frac{1280.55 \cdot (145.48^2 - 157.08^2)}{(145.48^2 - 157.08^2)^2 + 4 \cdot 26.09^2 \cdot 157.08^2} = -0.057$$

$$M = -\frac{2k \cdot \omega_1 \cdot a}{(\omega^2 - \omega_1^2)^2 + 4k^2 \cdot \omega_1^2} = \frac{2 \cdot 26.09 \cdot 157.08 \cdot 1280.55}{(145.48^2 - 157.08^2)^2 + 4 \cdot 26.09^2 \cdot 157.08^2} = 0.132$$

$$A_1 = \sqrt{M^2 + N^2} = \sqrt{(-0.0178)^2 + (-0.0167)^2} = 0.144$$

$$\phi_1 = \arctg \frac{M}{N} = \arctg \left(\frac{0.132}{0.057} \right) = 66.8^\circ \approx 67^\circ$$

$$X_{\text{ч}(1)} = 0.144 \cdot \sin(157.08 \cdot t + 66.8^\circ)$$

Отже загальний розв'язок:

$$X_{\text{заз}(1)} = X_{\text{заз}(2)} + X_{\text{ч}(1)} = 0.0606 \cdot e^{-27.6 \cdot t} \cdot \sin(145 \cdot t + 90) + 0.144 \cdot \sin(157.08 \cdot t + 66.8)$$

4. Інформаційне та технічне забезпечення:

- 4.1. Конспект лекцій з курсу “Математичне моделювання та ідентифікація електромеханічних систем”.
- 4.2. Конспект лекцій з курсу “Обчислювальна техніка та програмування”
- 4.3. Методичні вказівки з курсу “Математичне моделювання та ідентифікація електромеханічних систем”[4].
- 4.4. Персональний комп'ютер з пакетами MathCAD та Visual Studio C#.
- 4.5. Демонстраційна програма до лабораторних робіт з курсу.

5. Заходи безпеки при виконанні лабораторної роботи

Лабораторна робота виконується в комп'ютерному класі. Інструктаж щодо виконання лабораторних робіт проводиться на першому занятті і фіксується в журналі техніки безпеки.

6. Порядок виконання лабораторної роботи

- 6.1. В пакеті MathCAD розрахувати перехідний процес.
- 6.2. Розроблений додаток в середовищі Visual Studio C# лабораторної роботи №2 доповнити розрахунком перехідного процесу.
- 6.3. Проаналізувати та порівняти результати розрахунків.

7. Оформлення звіту та порядок його подання

Якщо лабораторна робота виконана на комп'ютері і перевірена викладачем, наступний етап - підготовка звіту та його захист. Звіт оформляється згідно вимог щодо оформлення звітів.

Захист лабораторної роботи відбувається на наступному занятті.

Звіт складається з таких розділів:

1. Назва лабораторної роботи.
2. Мета лабораторної роботи.
3. Задачі лабораторної роботи.
4. Теоретичні відомості до виконання лабораторної роботи.
5. Інформаційне та технічне забезпечення.
6. Розрахунки в MathCAD.
7. Програма розрахунків в середовищі Visual Studio C#.
8. Результат роботи програми (інтерфейс).

Висновки.

8.Контрольні запитання для підготовки до лабораторної роботи :

1. Основа метода Даламбера.
2. Диференціальне рівняння руху в прискореннях.
3. Структура загального розв'язку неоднорідного рівняння.
4. Вплив розв'язку характеристичного рівняння на процес руху зведеної маси.
5. Суть методу невизначених коефіцієнтів.
6. Вільні і вимушені коливання та їх параметри (амплітуда, частота, початкова та поточна фази).
7. Затухаючі коливання в перехідному процесі.

9. Список рекомендованої літератури

]

1. Яблонский А.А. Курс теоретической механики. Ч. II. Динамика. Изд. 4-е, дополн., Учебник для высших технических учебных заведений. М.: Высшая школа. 1971.-488 с.

2. Бермант А.Ф., Араманович И.Г. Краткий курс математического анализа для втузов. М.: Наука. 1966.-736 с.

3. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления. Для втузов, том второй.- М.: 1976 г.-С 155.

4. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни "Математичне моделювання електромеханічних систем" для студентів напряму підготовки 6.050702 "Електромеханіка" [Електронний ресурс]/ НТУУ "КПІ"; уклад. В.М. Сліденко, В.О. Поліщук. –Електронні текстові дані (1 файл: 940 Кбайт). – К.: НТУУ "КПІ", 2013. -43 с. – Назва з екрана. – Доступ : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/7577>

Додаток. Приклад виконання розрахунків в MathCad

$$A1 := 1202 \quad w1p := 157.08 \quad w := 124.109 \quad k25 := 3.6 \quad Xp := 0.076$$

$$f := \sqrt{k25^2 + w^2} = 124.161$$

$$y1 := A1 \cdot (w^2 - w1p^2) = -1.114 \times 10^7$$

$$y2 := \left((w^2 - w1p^2) \right)^2 + 4 \cdot k25^2 \cdot w1p^2 = 8.723 \times 10^7$$

$$N := \frac{y1}{y2} = -0.128$$

$$M := \frac{-(2 \cdot k25 \cdot w1p \cdot A1)}{(w^2 - w1p^2)^2 + 4 \cdot k25^2 \cdot w1p^2} = -0.016$$

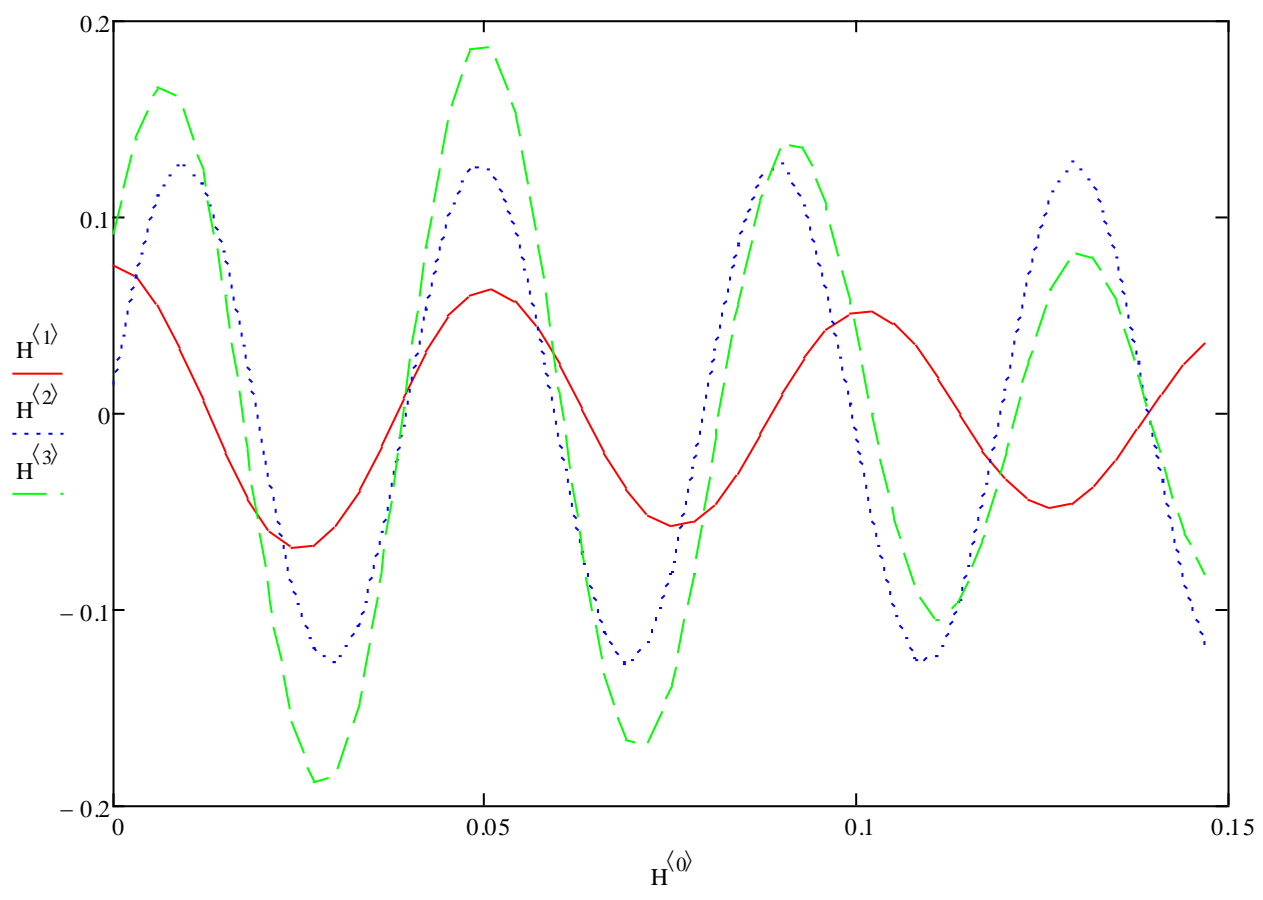
$$A2 := \sqrt{M^2 + N^2} = 0.129$$

$$fi := \operatorname{atan}\left(\frac{M}{N}\right) = 0.121$$

$$H := \begin{array}{l} xzag_0 \leftarrow 0 \\ xchact_0 \leftarrow 0 \\ Xzag_0 \leftarrow 0 \\ i \leftarrow 0 \\ t1_0 \leftarrow 0 \\ t_0 \leftarrow 0 \\ \text{while } t_i \leq 0.15 \\ \quad \begin{array}{l} xzag_i \leftarrow Xp \cdot e^{-k25 \cdot t_i} \cdot \sin\left(f \cdot t_i + \frac{\pi}{2}\right) \\ xchact_i \leftarrow A2 \cdot \sin(w1p \cdot t_i + fi) \\ Xzag_i \leftarrow xzag_i + xchact_i \\ t1_i \leftarrow t_i \\ i \leftarrow i + 1 \\ t_i \leftarrow t_{i-1} + 0.003 \end{array} \\ \text{augment}(t1, xzag, xchact, Xzag) \end{array}$$

	0	1	2	3
0	0	0.076	0.016	0.092
1	$3 \cdot 10^{-3}$	0.07	0.072	0.142
2	$6 \cdot 10^{-3}$	0.055	0.113	0.167
3	$9 \cdot 10^{-3}$	0.032	0.129	0.161
4	0.012	$5.879 \cdot 10^{-3}$	0.117	0.123
5	0.015	-0.021	0.079	0.059
6	0.018	-0.044	0.025	-0.019
7	0.021	-0.061	-0.035	-0.096
8	0.024	-0.069	-0.088	-0.156
9	0.027	-0.067	-0.121	-0.188
10	0.03	-0.057	-0.128	-0.185
11	0.033	-0.039	-0.107	-0.146
12	0.036	-0.016	-0.062	-0.079
13	0.039	$8.555 \cdot 10^{-3}$	$-4.59 \cdot 10^{-3}$	$3.965 \cdot 10^{-3}$
14	0.042	0.031	0.054	0.086
15	0.045	0.05	0.101	...

H =



Лабораторна робота №4 перевіряється тестовою програмою

Лабораторна робота №5

Дослідження коливань одномасової моделі за умов резонансу

1.Мета: дослідження коливань одномасової моделі при зміні параметрів та їх співвідношень в умовах резонансу.

2.Задачі:

2.1.Сформулювати математичну модель перехідного процесу, систематизувавши необхідні параметри та функції.

2.2. Провести розрахунки в MathCAD.

2.3. Доповнити розроблений додаток в С# дослідженнями коливань однієї масової моделі;

2.4. Проаналізувати та порівняти результати розрахунків.

3.Основні теоретичні відомості

Резонанс - це явище, яке пов'язано з різким зростанням амплітуди A_1 , вимушених коливань, які встановились, коли частота ω_1 зовнішньої дії на коливальну систему наближається до частоти власних коливань ω .

Залежність $A_1 = f(\omega_1)$ називають **резонансною кривою** [1] .

Дослідження впливу параметрів k , ω , ω_1 на амплітуду A [2-3]

Частинний розв'язок рівняння руху:

$$x'' + 2 \cdot k \cdot x' + \omega^2 \cdot x = a \cdot \sin \omega_1 t$$

$$x_q = A_1 \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi_1)$$

$$A_1 = \sqrt{M^2 + N^2}$$

$$M = \frac{2ka\omega_1}{(\omega^2 + \omega_1^2) + 4k^2\omega_1}$$

$$N = \frac{a(\omega^2 - \omega_1^2)}{(\omega^2 - \omega_1^2)^2 + 4k^2\omega}$$

$$\begin{aligned} A_1 = \sqrt{M^2 + N^2} &= \sqrt{\frac{4 \cdot k^2 \cdot a^2 \cdot \omega_1^2 + (\omega^2 - \omega_1^2)^2 \cdot a^2}{[4 \cdot k^2 \cdot \omega_1^2 + (\omega^2 - \omega_1^2)^2]^2}} = \frac{a}{\sqrt{4 \cdot k^2 \cdot \omega_1^2 + (\omega^2 - \omega_1^2)^2} \cdot \frac{\omega^2}{\omega^2}} = \\ &= \frac{a/\omega^2}{\sqrt{4 \cdot k^2 \cdot \frac{\omega_1^2}{\omega^2} + \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega^2}\right)^2}} \end{aligned}$$

Вводимо заміну:

$$\frac{\omega}{\omega_1} = q, \frac{2k}{\omega} = \alpha$$

$$L = (1 - q^2)^2 + \alpha^2 \cdot q^2 \quad (1)$$

Очевидно A_1 збільшується коли L зменшується.

Дослідимо екстремуми:

$$\frac{dL}{dq} = 0$$

$$2 \cdot (1 - q^2) \cdot (-2q) + 2 \cdot \alpha^2 \cdot q = 0$$

При $q \neq 0$:

$$2 \cdot (1 - q^2) = \alpha^2$$

$$1 - \frac{\alpha^2}{2} = q^2$$

$$q = \pm \sqrt{1 - \frac{\alpha^2}{2}}$$

Підставимо (2) -->(1):

$$A_1 = \frac{a}{\omega^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1 - 1 + \frac{\alpha^2}{2}\right)^2 + \alpha^2 \cdot \left(1 - \frac{\alpha^2}{2}\right)}} = \frac{a}{\omega^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{\alpha^4}{4} + \alpha^2 - \frac{\alpha^4}{2}}} = \frac{a}{\omega^2 \cdot \frac{2k}{\omega}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{4k^2}{4\omega^2}}} =$$

$$= \frac{a}{2k} \cdot \frac{1}{\sqrt{\omega^2 - k^2}}$$

$$A_1 = \frac{a}{2k} \cdot \frac{1}{\sqrt{\omega^2 - k^2}}$$

Висновок:

Якщо $k = 0$, то $A_1 \Rightarrow \infty$, розрив 2-го роду, але з іншого боку при $k = 0$, $\alpha = 0$.

Зробимо підстановку $\alpha = 0$ в (4.1), тоді:

$$A_1 = \frac{a}{\omega^2} \cdot \frac{1}{1 - q^2} = \frac{a}{\omega^2 \cdot \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega^2}\right)} = \frac{a}{\omega^2 - \omega_1^2} \quad (2)$$

$$A_1 \Rightarrow \infty \text{ при } \omega_1 = \omega, \text{ або } k = 1$$

Важливим фактором є співпадіння частот і враховуючи, що $\omega = \sqrt{\frac{c}{m}}$, то важливим є параметр жорсткості системи. Для різних інженерних задач, варіації цього параметру можуть застосовуватись як для вітрозахисту (жорсткість апроксимується поліномом 3-го порядку). Для інженерних конструкцій жорсткість, яка призводить до мінімізації коефіцієнта динамічності, відповідає кубічній параболі [4-7]. З другого боку вибором жорсткості можна збільшити амплітуду коливань (до резонансної частоти).

Розв'язок диференційного рівняння руху за умови, що $k=0$:

$$x'' + \omega^2 \cdot x = a \cdot \sin \omega_1 t \quad (3)$$

$$x = A \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) + \frac{a}{\omega^2 - \omega_1^2} \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \quad (4)$$

Таким чином при $k=0$ рух одномасової моделі отримується в результаті накладання власних коливань та вимушених.

Якщо $\omega_1 = \omega$, то розв'язок (4) не буде розв'язком рівняння (3) через кратність кореня характеристичного рівняння з частотою вимушеної сили:

$$r = \pm i\omega, \quad \omega_1 = \omega$$

Тоді частинний розв'язок (3) слід шукати у формі:

$$x_q = t \cdot (M \cdot \cos \omega_1 t + N \cdot \sin \omega_1 t)$$

$$\begin{aligned} x_q' &= M \cdot \cos \omega_1 t + N \cdot \sin \omega_1 t + t \cdot (-M \cdot \omega_1 \cdot \sin \omega_1 t + N \cdot \omega_1 \cdot \cos \omega_1 t) = \\ &= \cos \omega_1 t \cdot (M + N \cdot \omega_1 \cdot t) + \sin \omega_1 t \cdot (N - M \cdot \omega_1 \cdot t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_q'' &= -\sin \omega_1 t \cdot \omega_1 \cdot (M + N \cdot \omega_1 \cdot t) + \cos \omega_1 t \cdot N \cdot \omega_1 + \\ &+ \cos \omega_1 t \cdot \omega_1 \cdot (N - M \cdot \omega_1 \cdot t) + \sin \omega_1 t \cdot (-M \cdot \omega_1) = \\ &= \cos \omega_1 t \cdot (2 \cdot N \cdot \omega_1 - M \cdot \omega_1^2 \cdot t) + \sin \omega_1 t \cdot (-2 \cdot M \cdot \omega_1 - N \cdot \omega_1^2 \cdot t) + \\ &+ \cos \omega_1 t \cdot (2 \cdot N \cdot \omega_1 - M \cdot \omega_1^2 \cdot t) + \sin \omega_1 t \cdot (-2 \cdot M \cdot \omega_1 - N \cdot \omega_1^2 \cdot t) + \\ &+ \omega^2 \cdot t \cdot (M \cdot \cos \omega_1 t + N \cdot \sin \omega_1 t) = a \cdot \sin \omega_1 t \end{aligned}$$

$$\begin{cases} 2 \cdot N \cdot \omega_1 - M \cdot \omega_1^2 \cdot t + M \cdot \omega^2 \cdot t = 0 \\ -2 \cdot M \cdot \omega_1 - N \cdot \omega_1^2 \cdot t + N \cdot \omega^2 \cdot t = a \end{cases}$$

$$M = \frac{2 \cdot N \cdot \omega_1}{(\omega_1^2 - \omega^2) \cdot t}$$

$$\frac{-4 \cdot N \cdot \omega_1^2}{t \cdot (\omega_1^2 - \omega^2)} - N \cdot t \cdot (\omega_1^2 - \omega^2) = a$$

$$\frac{-4 \cdot N \cdot \omega_1^2 - N \cdot t^2 \cdot (\omega_1^2 - \omega^2)^2}{t \cdot (\omega_1^2 - \omega^2)} = a$$

$$N = \frac{a \cdot t \cdot (\omega_1^2 - \omega^2)}{-4 \cdot \omega_1^2 - t^2 \cdot (\omega_1^2 - \omega^2)^2}$$

$$\begin{aligned} M &= \frac{2 \cdot \omega_1}{(\omega_1^2 - \omega^2) \cdot t} \cdot \frac{a \cdot t \cdot (\omega_1^2 - \omega^2)}{-4 \cdot \omega_1^2 - t^2 \cdot (\omega_1^2 - \omega^2)^2} = \\ &= \frac{2 \cdot \omega_1 \cdot a}{-4 \cdot \omega_1^2 - t^2 \cdot (\omega_1^2 - \omega^2)^2} \end{aligned}$$

Якщо $\omega_1 = \omega$, тоді:

$$\begin{cases} N = 0 \\ M = -\frac{a}{2 \cdot \omega_1} \end{cases}$$

Тоді частинний розв'язок має вигляд:

$$x_q = -\frac{a}{2 \cdot \omega_1} \cdot t \cdot \cos \omega_1 t$$

Загальний розв'язок рівняння (3) при $\omega_1 = \omega$:

$$x = A \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) - \frac{a}{2 \cdot \omega_1} \cdot t \cdot \cos \omega_1 t$$

Другий член останнього рівняння показує, що в цьому випадку амплітуда коливань необмежено збільшується при необмеженому збільшенні t . Графік цієї функції відображає фізичний процес початку і наростання руйнуючих резонансних коливань (для механічних систем). Явище автоколивань в мостобудуванні та в багатьох інших. Для зниження впливу резонансних коливань, застосовується спеціальні пристрої – антирезонатори, які в процесі коливань починають коливатися в протифазі до коливань вузла машин, якого вони захищають [1; 5].

Розрахунок та побудова графіків залежностей амплітуди і частотного параметра

Вихідні дані:

$$\omega_1 = 157.08 \text{ 1/с}, \omega = 145 \text{ 1/с}, k = 26.09 \text{ 1/с}, a = 1280.55 \text{ Н/кг}, A = 0.0607 \text{ м}.$$

$$A_1(\omega) := \frac{a}{\omega^2 \cdot \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega}\right)^2\right]^2 + (\alpha)^2 \cdot \left(\frac{\omega_1}{\omega}\right)^2}} \quad - \text{ розрахункова формула.}$$

Результати розрахунку характерних точок зведені в таблиці 1. Графіки побудовані на рис. 1.

Таблиця 1

Частотний параметр η	Значення амплітуд коливань A_1 [м] в залежності від коефіцієнта $\alpha = 2k/\omega$			
	$\alpha=0,358689$	$\alpha_1=0,0001$ практично $\alpha_1=0$	$\alpha_2=0,2$	$\alpha_3=0,5$
0.000000	0.054464	0.054464	0.054464	0.054464
0.050000	0.054592	0.054601	0.054598	0.054584
0.100000	0.054979	0.055015	0.055003	0.054945
0.150000	0.055634	0.055718	0.055692	0.055555
0.200000	0.056576	0.056734	0.056685	0.056428
0.250000	0.057831	0.058095	0.058013	0.057586
0.300000	0.059437	0.059851	0.059721	0.059054
0.350000	0.061442	0.062068	0.061871	0.060869
0.400000	0.063913	0.064839	0.064547	0.063075
0.450000	0.066937	0.068294	0.067863	0.065728
0.500000	0.070628	0.072619	0.071982	0.068893
0.550000	0.075138	0.078085	0.077132	0.072643
0.600000	0.080662	0.085101	0.083643	0.077055
0.650000	0.087453	0.094311	0.092008	0.082189
0.700000	0.095811	0.106793	0.102983	0.088052
0.750000	0.106046	0.124490	0.117761	0.094520
0.800000	0.118306	0.151290	0.138251	0.101208
0.850000	0.132111	0.196268	0.167360	0.107303
0.900000	0.145400	0.286655	0.208098	0.111501
0.950000	0.153668	0.558609	0.255036	0.112320
1.000000	0.151843	544.644348	0.272322	0.108929
1.050000	0.139537	0.531361	0.233073	0.101819
1.100000	0.121855	0.259354	0.179078	0.092512
1.150000	0.104019	0.168882	0.137497	0.082614
1.200000	0.088485	0.123783	0.108668	0.073201
1.250000	0.075716	0.096826	0.088480	0.064773
1.300000	0.065400	0.078934	0.073864	0.057455
1.350000	0.057063	0.066218	0.062915	0.051188
1.400000	0.050271	0.056734	0.054464	0.045841
1.450000	0.044679	0.049401	0.047776	0.041276
1.500000	0.040022	0.043572	0.042368	0.037362
1.550000	0.036101	0.038834	0.037919	0.033990
1.600000	0.032766	0.034913	0.034201	0.031066
1.650000	0.029904	0.031619	0.031055	0.028517
1.700000	0.027425	0.028817	0.028362	0.026282
1.750000	0.025263	0.026407	0.026035	0.024310
1.800000	0.023363	0.024314	0.024006	0.022562
1.850000	0.021684	0.022483	0.022225	0.021004
1.900000	0.020191	0.020868	0.020650	0.019609
1.950000	0.018856	0.019434	0.019249	0.018355
2.000000	0.017657	0.018155	0.017996	0.017223

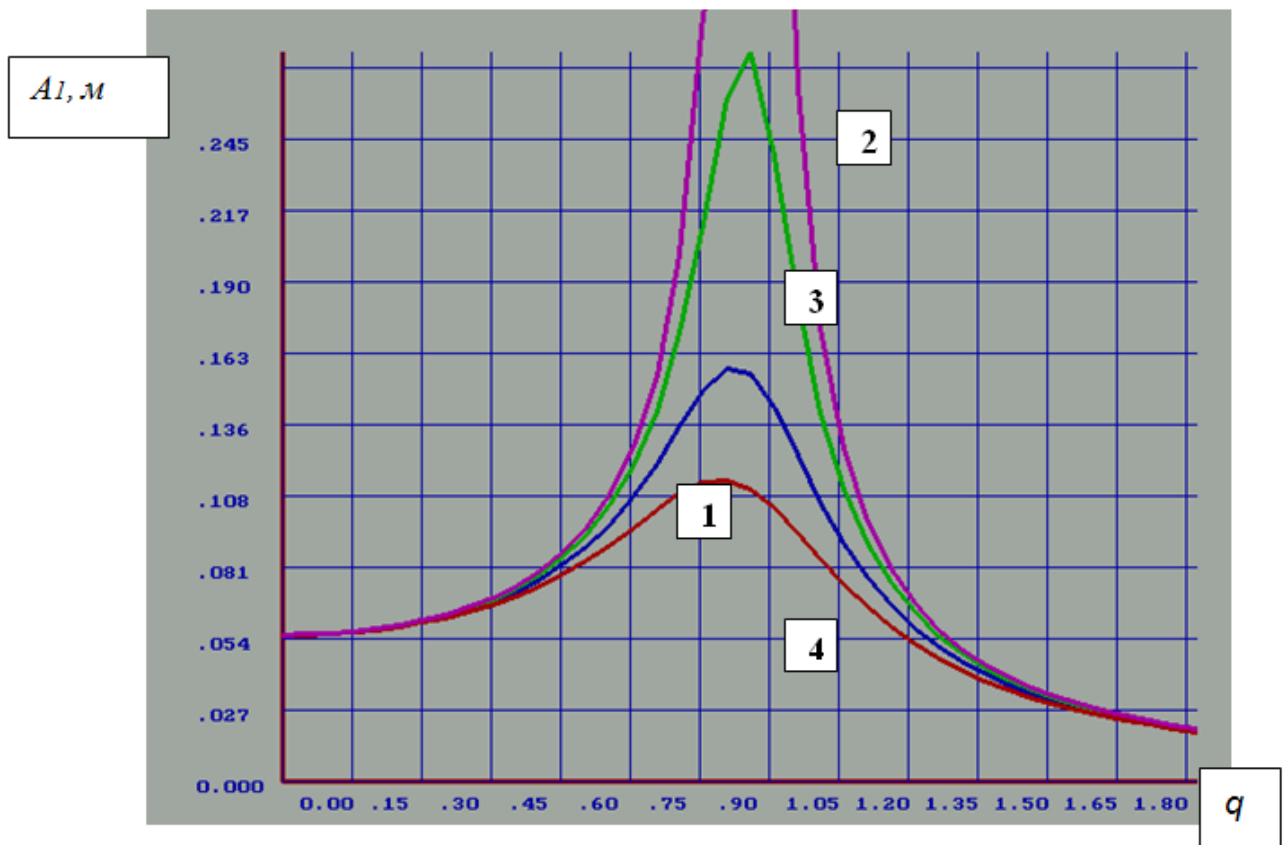


Рисунок 1 - Графіки залежностей амплітуди від частотного параметра q :
1 - $\alpha=0,358689$ - за заданим варіантом; **2** - $\alpha=0$ (дисипація відсутня);
2 - $\alpha_2=0,2$; **3** - $\alpha_3=0,5$.

Розрахунок та побудова графіків функції $x_{\text{част}} = f(t)$ в точці резонансу

Розрахунок точок графіка за формулою:

$$x_q = -\frac{a}{2 \cdot \omega_1} \cdot t \cdot \cos \omega_1 t$$

Дані розрахунків зведені в таблицю 2.

Графік косинусоїди наведено на рис. 2.

Таблица 4.2

t, с	X част, М
0.000000	-0.000000
0.003000	-0.014307
0.006000	-0.022440
0.009000	-0.019677
0.012000	-0.003911
0.015000	0.023703
0.018000	0.058763
0.021000	0.094310
0.024000	0.122094
0.027000	0.134183
0.030000	0.124648
0.033000	0.090987
0.036000	0.035012
0.039000	-0.036991
0.042000	-0.114932
0.045000	-0.186323
0.048000	-0.238254
0.051000	-0.259605
0.054000	-0.243149
0.057000	-0.187157
0.060000	-0.096209
0.063000	0.018994
0.066000	0.142834
0.069000	0.256899
0.072000	0.342706
0.075000	0.384646
0.078000	0.372671
0.081000	0.304293
0.084000	0.185513
0.087000	0.030485
0.090000	-0.140117
0.093000	-0.301847
0.096000	-0.429993
0.099000	-0.503323
0.102000	-0.507524
0.105000	-0.437771
0.108000	-0.300003
0.111000	-0.110624
0.114000	0.105382
0.117000	0.317740
0.120000	0.495121

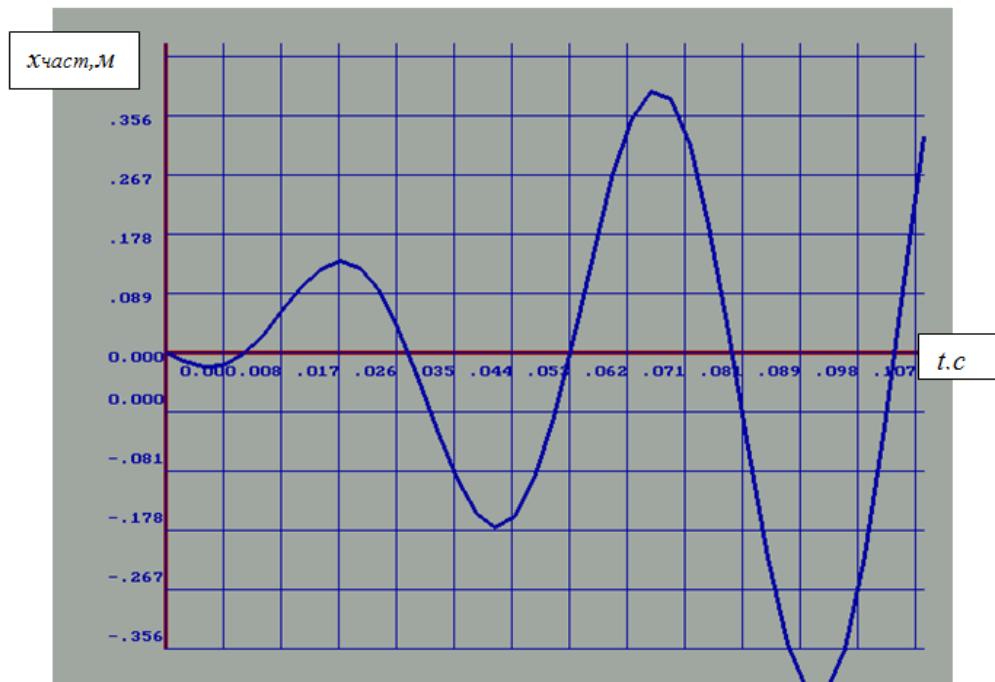


Рисунок 2. - Графік функції $x_{\text{част}} = f(t)$ в точці резонансу

4. Інформаційне та технічне забезпечення:

- 4.1. Конспект лекцій з курсу “Математичне моделювання та ідентифікація електромеханічних систем”.
- 4.2. Конспект лекцій з курсу “Обчислювальна техніка та програмування”
- 4.3. Методичні вказівки з курсу “Математичне моделювання та ідентифікація електромеханічних систем”.
- 4.4. Персональний комп’ютер з пакетами MathCAD та Visual Studio C#.
- 4.5. Демонстраційна програма до лабораторних робіт з курсу.

5. Заходи безпеки при виконанні лабораторної роботи

Лабораторна робота виконується в комп’ютерному класі. Інструктаж щодо виконання лабораторних робіт проводиться на першому занятті і фіксується в журналі техніки безпеки.

6. Порядок виконання лабораторної роботи

- 6.1. В пакеті MathCAD розрахувати перехідний процес.
- 6.2. Розроблений додаток в середовищі Visual Studio C# лабораторної роботи №2 доповнити розрахунком перехідного процесу [8].
- 6.3. Проаналізувати та порівняти результати розрахунків.

7.Оформлення звіту та порядок його подання

Якщо лабораторна робота виконана на комп'ютері і перевірена викладачем, наступний етап - підготовка звіту та його захист. Звіт оформляється згідно вимог щодо оформлення звітів.

Захист лабораторної роботи відбувається на наступному занятті.

Звіт складається з таких розділів:

1. Назва лабораторної роботи.
2. Мета лабораторної роботи.
3. Задачі лабораторної роботи.
4. Теоретичні відомості до виконання лабораторної роботи.
5. Інформаційне та технічне забезпечення.
6. Розрахунки в MathCAD.
7. Програма розрахунків в середовищі Visual Studio C#.
8. Результат роботи програми (інтерфейс).

Висновки.

8.Контрольні запитання для підготовки до лабораторної роботи :

1. За яких умов виникає резонанс?
2. Від яких параметрів залежить максимальна амплітуда при резонансі?
3. Вплив кратності коренів характеристичного рівняння на частинний розв'язок диференціального рівняння руху зведеної маси.
4. Вплив на резонансну криву коефіцієнта дисипації.
5. Косинусоїда резонансних коливань та найвпливовіший параметр.
6. Особливості програмного створення інтерфейсу в середовищі Visual Studio C# для проведення віртуальної лабораторної роботи по дослідженню вимушених коливань та резонансу.

9. Список рекомендованої літератури

1. Быховский И.И., Гольдштейн Б.Г. Основы конструирования вибробезопасных ручных машин.-М.: Машиностроение-1982. -224 с
2. Бермант А.Ф., Араманович И.Г. Краткий курс математического анализа для втузов. М.: Наука. 1966.-736 с.
3. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления. Для втузов, том второй.- М.: 1976 г.-С 155.
4. Стабілізація функціонування гірничої машини з імпульсним виконавчим органом/ Сліденко В.М., Шевчук С.П. -К.: , 2010 -192 с.
5. Сліденко В.М. Математичне моделювання ударно-хвильових процесів гідроімпульсних систем гірничих машин: монографія / В.М. Сліденко, О. М. Сліденко – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во “Політехніка”, 2017. – 220 с.
6. Адаптивне функціонування імпульсних виконавчих органів гірничих машин / Сліденко В.М., Шевчук С.П., Замараєва О.В., Лістовщик Л.К. -К.: НТУУ "КПІ", 2013 -179 с.

7. Потужна дисипація енергії коливань гірничих машин гетерогенними ліофобними системами/ Єрошенко В.А., Сліденко В.М., Шевчук С.П., Студенець В.П. - К.: НТУУ "КПІ", 2016 -180 с.

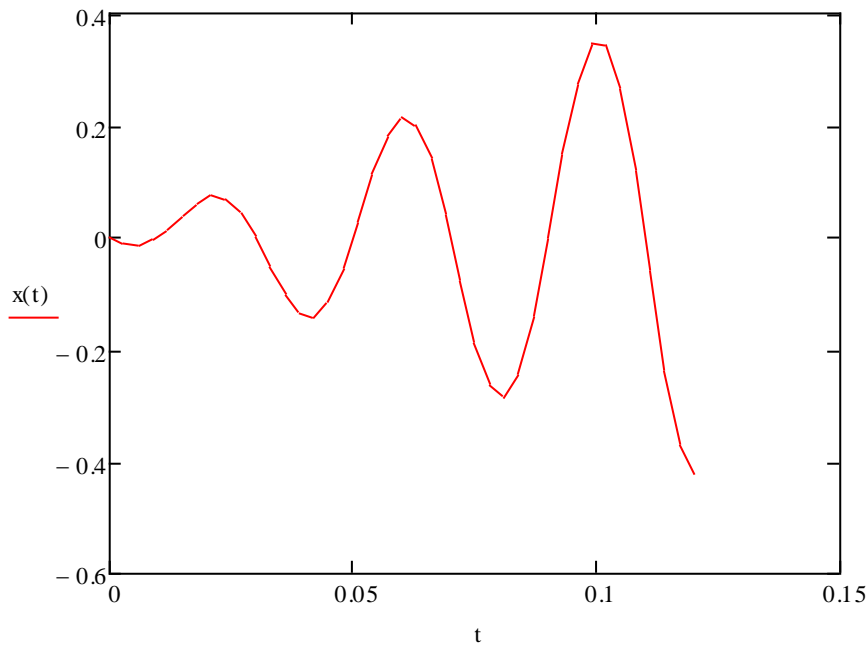
8. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Математичне моделювання електромеханічних систем” для студентів напряму підготовки 6.050702 ”Електромеханіка” [Електронний ресурс]/ НТУУ ”КПІ”; уклад. В.М. Сліденко, В.О. Поліщук. –Електронні текстові дані (1 файл: 940 Кбайт). – К.: НТУУ “КПІ”, 2013. -43 с. – Назва з екрана. – Доступ : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/7577>

Додаток 1. Приклад виконання розрахунків в MathCad

$$w_{lp} := 157.079 \quad w := 133.21' \quad a := 1115.68 \quad k := 3.86' \quad X_p := 0.06'$$

$$t := 0, (0 + 0.003) \dots 0.12$$

$$x(t) := \frac{-a}{2 \cdot w_{lp}} \cdot t \cdot \cos(w_{lp} \cdot t)$$



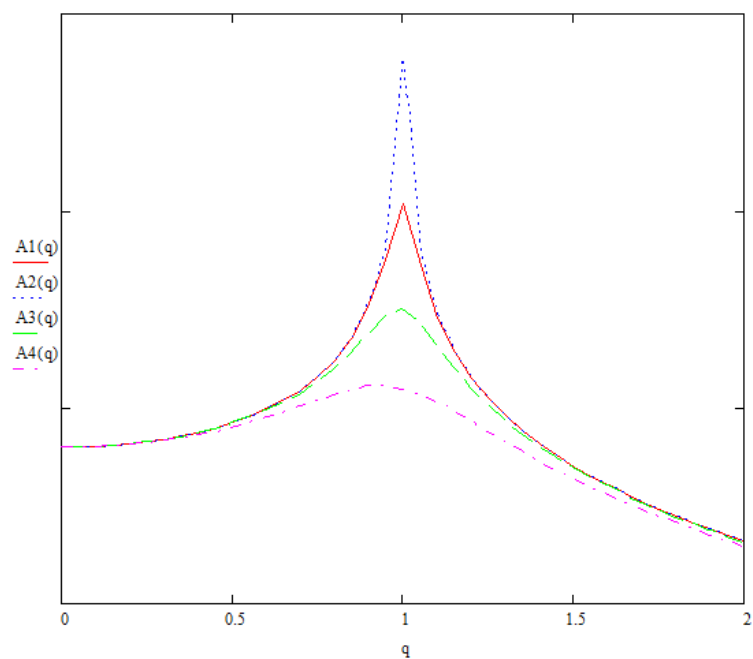
$$q := 0, (0 + 0.05) \dots 0.2 \quad \alpha := 2 \cdot \frac{k}{w} = 0.058$$

$$A1(q) := \frac{a}{w^2 \cdot \sqrt{[1 - (q)^2]^2 + \alpha^2 \cdot (q)^2}}$$

$$A2(q) := \frac{a}{w^2 \cdot \sqrt{[1 - (q)^2]^2 + 0.0001 \cdot (q)^2}}$$

$$A3(q) := \frac{a}{w^2 \cdot \sqrt{[1 - (q)^2]^2 + 0.2^2 \cdot (q)^2}}$$

$$A4(q) := \frac{a}{w^2 \cdot \sqrt{[1 - (q)^2]^2 + 0.5^2 \cdot (q)^2}}$$



```

V_w :=
  A1_0 ← 0
  A2_0 ← 0
  A3_0 ← 0
  A4_0 ← 0
  i ← 0
  q_0 ← 0
  k ← 0
  while q_i ≤ 2
    k ← 0
    A1_i ←  $\frac{a}{w^2 \cdot \sqrt{[1 - (q_i)^2]^2 + \alpha^2 \cdot (q_i)^2}}$ 
    A2_i ←  $\frac{a}{w^2 \cdot \sqrt{[1 - (q_i)^2]^2 + 0.03^2 \cdot (q_i)^2}}$ 
    A3_i ←  $\frac{a}{w^2 \cdot \sqrt{[1 - (q_i)^2]^2 + 0.2^2 \cdot (q_i)^2}}$ 
    A4_i ←  $\frac{a}{w^2 \cdot \sqrt{[1 - (q_i)^2]^2 + 0.5^2 \cdot (q_i)^2}}$ 
    i ← i + 1
    q_i ← q_{i-1} + 0.05
    k ← 0
  q1_0 ← 0
  for j ∈ 0..i - 1
    q1_j ← q_j
  augment(q1, A1, A2, A3, A4)

```

	0	1	2	3	4
0	0	0.063	0.063	0.063	0.063
1	0.05	0.063	0.063	0.063	0.063
2	0.1	0.063	0.063	0.063	0.063
3	0.15	0.064	0.064	0.064	0.064
4	0.2	0.065	0.065	0.065	0.065
5	0.25	0.067	0.067	0.067	0.066
6	0.3	0.069	0.069	0.069	0.068
V = 7	0.35	0.072	0.072	0.071	0.07
8	0.4	0.075	0.075	0.075	0.073
9	0.45	0.079	0.079	0.078	0.076
10	0.5	0.084	0.084	0.083	0.08
11	0.55	0.09	0.09	0.089	0.084
12	0.6	0.098	0.098	0.097	0.089
13	0.65	0.109	0.109	0.106	0.095
14	0.7	0.123	0.123	0.119	0.102
15	0.75	0.143	0.144	0.136	...

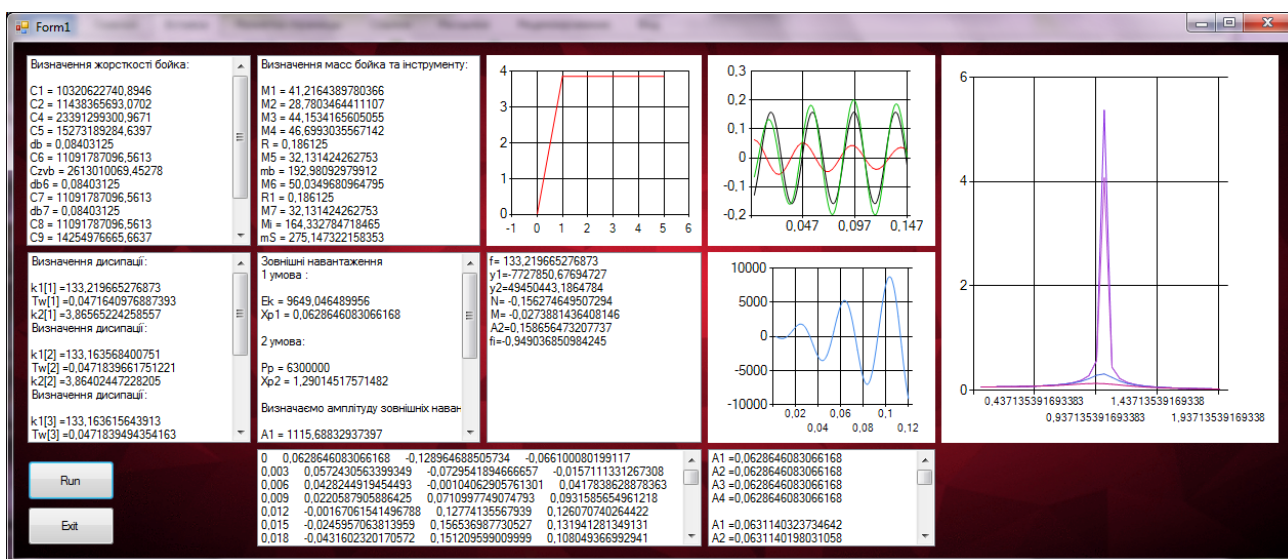
A1(q) =

0.063
0.063
0.063
0.064
0.065
0.067
0.069
0.072
0.075
0.079
0.084
0.09
0.098
0.109
0.123
...

q =

0
0.05
0.1
0.15
0.2
0.25
0.3
0.35
0.4
0.45
0.5
0.55
0.6
0.65
0.7
...

Додаток 2 - Приклад інтерфейсу виконаного в Visual Studio C#



Код програми

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;
```

```
namespace WindowsFormsApplication1
```

```
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        public double t3 { get; private set; }

        public Form1()
        {
            InitializeComponent();
            this.BackgroundImage = new Bitmap(@"D:\Valya\4
круп\2018\Melnik_23_08_2019\WindowsFormsApplication1\WindowsFormsApplication1\Properties\
121.gif");
            this.BackgroundImageLayout = ImageLayout.Stretch;
        }

        private void button2_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            Close();
        }

        private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
```

```

{
    double E = 2 * (Math.Pow(10, 11));
    double Cm = 49 * (Math.Pow(10, 5));

    double db1 = 0.165, db2 = 0.181, db4 = 0.136, db5 = 0.145;
    double lb1 = 0.280, lb2 = 0.220, lb4 = 0.254, lb5 = 0.320;
    double li1 = 0.300, li2 = li1, li3 = 0.100;
    double di1 = 0.165;
    double p = 7800;

    double y1, y2, N, M, A2, fi, f, c1, c2, c4, c5, db, db6, db7, c6, czvb, c7, c8, c9, c10, czvi, czvs,
    m1, m2, m3, m4, R, R1, m5, mb, m6, m7, mi, mS, w;
    double vb = 10, Ek, Xp1, Pp, Xp2, A1, noa = 5, w1, naad, naadi = 5, w1p;

    // Визначення жорсткості бойка

    listBox1.Visible = true;
    listBox2.Visible = true;
    listBox3.Visible = true;
    listBox4.Visible = true;
    listBox5.Visible = true;
    listBox6.Visible = true;
    listBox7.Visible = true;
    c1 = E * Math.PI * ((Math.Pow(db5, 2) / (4 * lb5)));
    c2 = E * Math.PI * ((Math.Pow(db4, 2) / (4 * lb4)));
    c4 = E * Math.PI * ((Math.Pow(db2, 2) / (4 * lb2)));
    c5 = E * Math.PI * ((Math.Pow(db1, 2) / (4 * lb1)));
    db = 0.5 * (li3 + (Math.Pow(db1, 2) / (4 * li3)));
    c6 = E * Math.PI * ((Math.Pow(db, 2) / (4 * li3)));

    czvb = 1 / ((1 / c1) + (1 / c2) + (1 / c4) + (1 / c5) + (1 / c6));

    listBox1.Items.Add("Визначення жорсткості бойка: ");
    listBox1.Items.Add("");
    listBox1.Items.Add("C1 = " + c1);
    listBox1.Items.Add("C2 = " + c2);
    listBox1.Items.Add("C4 = " + c4);
    listBox1.Items.Add("C5 = " + c5);
    listBox1.Items.Add("db = " + db);
    listBox1.Items.Add("C6 = " + c6);

    listBox1.Items.Add("Czvb = " + czvb);

    // Визначення жорсткості інструмента

    db6 = 0.5 * (li3 + (Math.Pow(di1, 2) / (4 * li3)));
    c7 = E * Math.PI * ((Math.Pow(db6, 2) / (4 * li3)));
    db7 = 0.5 * (li3 + (Math.Pow(di1, 2) / (4 * li3)));
    c8 = E * Math.PI * ((Math.Pow(db7, 2) / (4 * li3)));
    c9 = E * Math.PI * ((Math.Pow(di1, 2) / (4 * li2)));
    c10 = c9;
    czvi = 1 / ((1 / c7) + (1 / c8) + (1 / c9) + (1 / c10));

```

```

listBox1.Items.Add("db6 = " + db6);
listBox1.Items.Add("C7 = " + c7);
listBox1.Items.Add("db7 = " + db7);
listBox1.Items.Add("C8 = " + c8);
listBox1.Items.Add("C9 = " + c9);
listBox1.Items.Add("C10 = " + c10);
listBox1.Items.Add("Czvi = " + czvi);

// Визначення жорсткості всієї системи

czvs = 1 / ((1 / czvb) + (1 / czvi) + (1 / Cm));

listBox1.Items.Add("Czvs = " + czvs);

// Визначення маси бойка

m1 = Math.PI * p * lb5 * ((Math.Pow(db5, 2)) / 4);
m2 = Math.PI * p * lb4 * ((Math.Pow(db4, 2)) / 4);
m3 = Math.PI * p * lb2 * ((Math.Pow(db2, 2)) / 4);
m4 = Math.PI * p * lb1 * ((Math.Pow(db1, 2)) / 4);
R = (Math.Pow((db1), 2) + Math.Pow(li3, 2)) / (2 * li3);
m5 = Math.PI * Math.Pow(li3, 2) * (R - (db1 / 3)) * p;
mb = m1 + m2 + m3 + m4 + m5;

//Визначення маси інструменту

m6 = (Math.PI * p * li2 * Math.Pow(di1, 2)) / 4;
R1 = (Math.Pow((di1), 2) + Math.Pow(li3, 2)) / (2 * li3);
m7 = Math.PI * Math.Pow(li3, 2) * (R1 - (db1 / 3)) * p;
mi = m7 + m6 + m6 + m7; ;

//Визначення зведеної маси системи

mS = mb + (mi / 2);

listBox2.Items.Add("Визначення масс бойка та інструменту: ");
listBox2.Items.Add("");
listBox2.Items.Add("M1 = " + m1);
listBox2.Items.Add("M2 = " + m2);
listBox2.Items.Add("M3 = " + m3);
listBox2.Items.Add("M4 = " + m4);
listBox2.Items.Add("R = " + R);
listBox2.Items.Add("M5 = " + m5);
listBox2.Items.Add("mb = " + mb);
listBox2.Items.Add("M6 = " + m6);
listBox2.Items.Add("R1 = " + R1);
listBox2.Items.Add("M7 = " + m7);
listBox2.Items.Add("Mi = " + mi);
listBox2.Items.Add("mS = " + mS);

//Визначення дисипації

```



```

w = Math.Sqrt(czvs / mS);

double[] k1 = new double[6];
double[] Tw = new double[6];
double[] k2 = new double[6];
double[] D = new double[6];

k1[0] = 0;
Tw[0] = 0;
k2[0] = 0;
D[0] = 0;

chart1.Visible = true;
chart1.Series[0].Points.AddXY(0, D[0]);
for (int i = 1; i < 6; i++)
{
    k1[i] = Math.Sqrt((w * w) - Math.Pow(k2[i - 1], 2));
    Tw[i] = 2 * Math.PI / k1[i];
    k2[i] = 0.18232 / Tw[i];
    D[i] = k2[i];

    listBox3.Items.Add("Визначення дисипації: ");
    listBox3.Items.Add("");
    listBox3.Items.Add("k1[" + i + "] =" + k1[i]);
    listBox3.Items.Add("Tw[" + i + "] =" + Tw[i]);
    listBox3.Items.Add("k2[" + i + "] =" + k2[i]);

    chart1.Series[0].Points.AddXY(i, D[i]);
}

//Зовнішні навантаження
// 1 умова - реалізація максимального удару

Ek = (Math.Pow(vb, 2) * mb) / 2;
Xp1 = Math.Sqrt(2 * Ek / czvs);

// 2 умова - за умови забезпечення м'якості одного найслабшого елемента

Pp = 0.014 * 450 * Math.Pow(10, 6);
Xp2 = Pp / czvs;

//Вибираємо менше значення

double Xpmin = Xp1;

//Визначаємо амплітуду зовнішніх навантажень

A1 = (czvs * Xpmin) / mS;

```

```
//Визначення частоти зовнішніх навантажень
```

```
w1 = 2 * Math.PI * noa;  
double klmax = 131;  
naad = klmax / w1;
```

```
//Кінцеве розрахункове значення частоти зовнішніх навантажень
```

```
w1p = naadi * w1;
```

```
listBox4.Items.Add("Зовнішні навантаження ");  
listBox4.Items.Add("1 умова : ");  
listBox4.Items.Add("");  
listBox4.Items.Add("Ek = " + Ek);  
listBox4.Items.Add("Xp1 = " + Xp1);  
listBox4.Items.Add("");  
listBox4.Items.Add("2 умова: ");  
listBox4.Items.Add("");
```

```
listBox4.Items.Add("Pp = " + Pp);  
listBox4.Items.Add("Xp2 = " + Xp2);  
listBox4.Items.Add("");  
listBox4.Items.Add("Визначаємо амплітуду зовнішніх навантажень : ");  
listBox4.Items.Add("");  
listBox4.Items.Add("A1 = " + A1);  
listBox4.Items.Add("");  
listBox4.Items.Add("Визначення частоти зовнішніх навантажень : ");  
listBox4.Items.Add("");  
listBox4.Items.Add("W1 = " + w1);  
listBox4.Items.Add("Naad = " + naad);  
listBox4.Items.Add("");  
listBox4.Items.Add("Кінцеве розрахункове значення частоти зовнішніх навантажень : ");  
listBox4.Items.Add("");  
listBox4.Items.Add("W1p = " + w1p);  
listBox4.Items.Add("w = " + w);
```

```
//3 практика
```

```
f = Math.Sqrt(Math.Pow(k2[0], 2) + Math.Pow(w, 2));  
y1 = A1 * (Math.Pow(w, 2) - Math.Pow(w1p, 2));  
y2 = Math.Pow((Math.Pow(w, 2) - Math.Pow(w1p, 2)), 2) + 4 * Math.Pow(k2[5], 2) *  
Math.Pow(w1p, 2);  
N = y1 / y2;  
M = (-2 * k2[5] * w1p * A1) / (Math.Pow((Math.Pow(w, 2) - Math.Pow(w1p, 2)), 2) + 4 *  
Math.Pow(k2[5], 2) * Math.Pow(w1p, 2));  
A2 = Math.Sqrt(Math.Pow(M, 2) + Math.Pow(N, 2));  
fi = Math.Atan(M / N - Math.PI / 2);  
  
int i1 = 0;
```

```
double[] xzag = new double[60];
double[] xchact = new double[60];
double[] Xzag = new double[60];
double[] t1 = new double[60];
double[] t = new double[60];
```

```
chart2.Visible = true;
t[i1] = 0;
while (t[i1] <= 0.15)
{
    xzag[i1] = Xp1 * Math.Exp(-k2[5] * t[i1]) * Math.Sin(f * t[i1] + (Math.PI / 2));
    xchact[i1] = A2 * Math.Sin(w1p * t[i1] + fi);
    Xzag[i1] = xzag[i1] + xchact[i1];
    t1[i1] = t[i1];
```

```
    chart2.Series[0].Points.AddXY(t[i1], xzag[i1]);
    chart2.Series[1].Points.AddXY(t[i1], xchact[i1]);
    chart2.Series[2].Points.AddXY(t[i1], Xzag[i1]);
```

```
    listBox6.Items.Add(t[i1].ToString() + "    " + xzag[i1].ToString() + "    " +
xchact[i1].ToString() + "    " + Xzag[i1].ToString());
```

```
    i1 = i1 + 1;
    t[i1] = t[i1 - 1] + 0.003;
}
```

```
listBox5.Items.Add("f= " + f);
listBox5.Items.Add("y1=" + y1);
listBox5.Items.Add("y2=" + y2);
listBox5.Items.Add("N= " + N);
listBox5.Items.Add("M= " + M);
listBox5.Items.Add("A2=" + A2);
listBox5.Items.Add("fi=" + fi);
```

//4 практика

```
double q = 0, alfa, A1_1, A1_2, A1_3, A1_4, h, i2, cx = 0, Xch;
```

```
chart3.Visible = true;
alfa = 2 * cx / w;
```

```
while (q <= 2)
{
    i2 = Math.Pow(q, 2);
    h = Math.Pow(1 - i2, 2);
    A1_1 = A1 / (w * w * (Math.Sqrt(h + alfa * alfa * i2)));
    A1_2 = A1 / (w * w * (Math.Sqrt(h + 0.0001 * i2)));
    A1_3 = A1 / (w * w * (Math.Sqrt(h + 0.2 * 0.2 * i2)));
    A1_4 = A1 / (w * w * (Math.Sqrt(h + 0.5 * 0.5 * i2)));
    listBox7.Items.Add("A1 =" + A1_1.ToString());
    listBox7.Items.Add("A2 =" + A1_2.ToString());
    listBox7.Items.Add("A3 =" + A1_3.ToString());
```

```

        listBox7.Items.Add("A4 =" + A1_4.ToString());
        listBox7.Items.Add("");
        chart3.Series[0].Points.AddXY(q, A1_1);
        chart3.Series[1].Points.AddXY(q, A1_2);
        chart3.Series[2].Points.AddXY(q, A1_3);
        chart3.Series[3].Points.AddXY(q, A1_4);
        q = q + Xp1;
    }

    chart4.Visible = true;
    while (cx <= 0.12)
    {
        Xch = -((A1 / 2 * w1p) * cx * Math.Cos(w1p * cx));
        cx = cx + 0.003;
        listBox7.Items.Add("Xch =" + Xch.ToString());
        chart4.Series[0].Points.AddXY(cx, Xch);
    }
} } }

```